



Acerca de este libro

Esta es una copia digital de un libro que, durante generaciones, se ha conservado en las estanterías de una biblioteca, hasta que Google ha decidido escanearlo como parte de un proyecto que pretende que sea posible descubrir en línea libros de todo el mundo.

Ha sobrevivido tantos años como para que los derechos de autor hayan expirado y el libro pase a ser de dominio público. El que un libro sea de dominio público significa que nunca ha estado protegido por derechos de autor, o bien que el período legal de estos derechos ya ha expirado. Es posible que una misma obra sea de dominio público en unos países y, sin embargo, no lo sea en otros. Los libros de dominio público son nuestras puertas hacia el pasado, suponen un patrimonio histórico, cultural y de conocimientos que, a menudo, resulta difícil de descubrir.

Todas las anotaciones, marcas y otras señales en los márgenes que estén presentes en el volumen original aparecerán también en este archivo como testimonio del largo viaje que el libro ha recorrido desde el editor hasta la biblioteca y, finalmente, hasta usted.

Normas de uso

Google se enorgullece de poder colaborar con distintas bibliotecas para digitalizar los materiales de dominio público a fin de hacerlos accesibles a todo el mundo. Los libros de dominio público son patrimonio de todos, nosotros somos sus humildes guardianes. No obstante, se trata de un trabajo caro. Por este motivo, y para poder ofrecer este recurso, hemos tomado medidas para evitar que se produzca un abuso por parte de terceros con fines comerciales, y hemos incluido restricciones técnicas sobre las solicitudes automatizadas.

Asimismo, le pedimos que:

- + *Haga un uso exclusivamente no comercial de estos archivos* Hemos diseñado la Búsqueda de libros de Google para el uso de particulares; como tal, le pedimos que utilice estos archivos con fines personales, y no comerciales.
- + *No envíe solicitudes automatizadas* Por favor, no envíe solicitudes automatizadas de ningún tipo al sistema de Google. Si está llevando a cabo una investigación sobre traducción automática, reconocimiento óptico de caracteres u otros campos para los que resulte útil disfrutar de acceso a una gran cantidad de texto, por favor, envíenos un mensaje. Fomentamos el uso de materiales de dominio público con estos propósitos y seguro que podremos ayudarle.
- + *Conserve la atribución* La filigrana de Google que verá en todos los archivos es fundamental para informar a los usuarios sobre este proyecto y ayudarles a encontrar materiales adicionales en la Búsqueda de libros de Google. Por favor, no la elimine.
- + *Manténgase siempre dentro de la legalidad* Sea cual sea el uso que haga de estos materiales, recuerde que es responsable de asegurarse de que todo lo que hace es legal. No dé por sentado que, por el hecho de que una obra se considere de dominio público para los usuarios de los Estados Unidos, lo será también para los usuarios de otros países. La legislación sobre derechos de autor varía de un país a otro, y no podemos facilitar información sobre si está permitido un uso específico de algún libro. Por favor, no suponga que la aparición de un libro en nuestro programa significa que se puede utilizar de igual manera en todo el mundo. La responsabilidad ante la infracción de los derechos de autor puede ser muy grave.

Acerca de la Búsqueda de libros de Google

El objetivo de Google consiste en organizar información procedente de todo el mundo y hacerla accesible y útil de forma universal. El programa de Búsqueda de libros de Google ayuda a los lectores a descubrir los libros de todo el mundo a la vez que ayuda a autores y editores a llegar a nuevas audiencias. Podrá realizar búsquedas en el texto completo de este libro en la web, en la página <http://books.google.com>



A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

- + *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.
- + *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.
- + *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.
- + *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse <http://books.google.com>

COLUMBIA LIBRARIES OFFSITE



CU07535090

Engineering Reading Room

D621.3



So 1

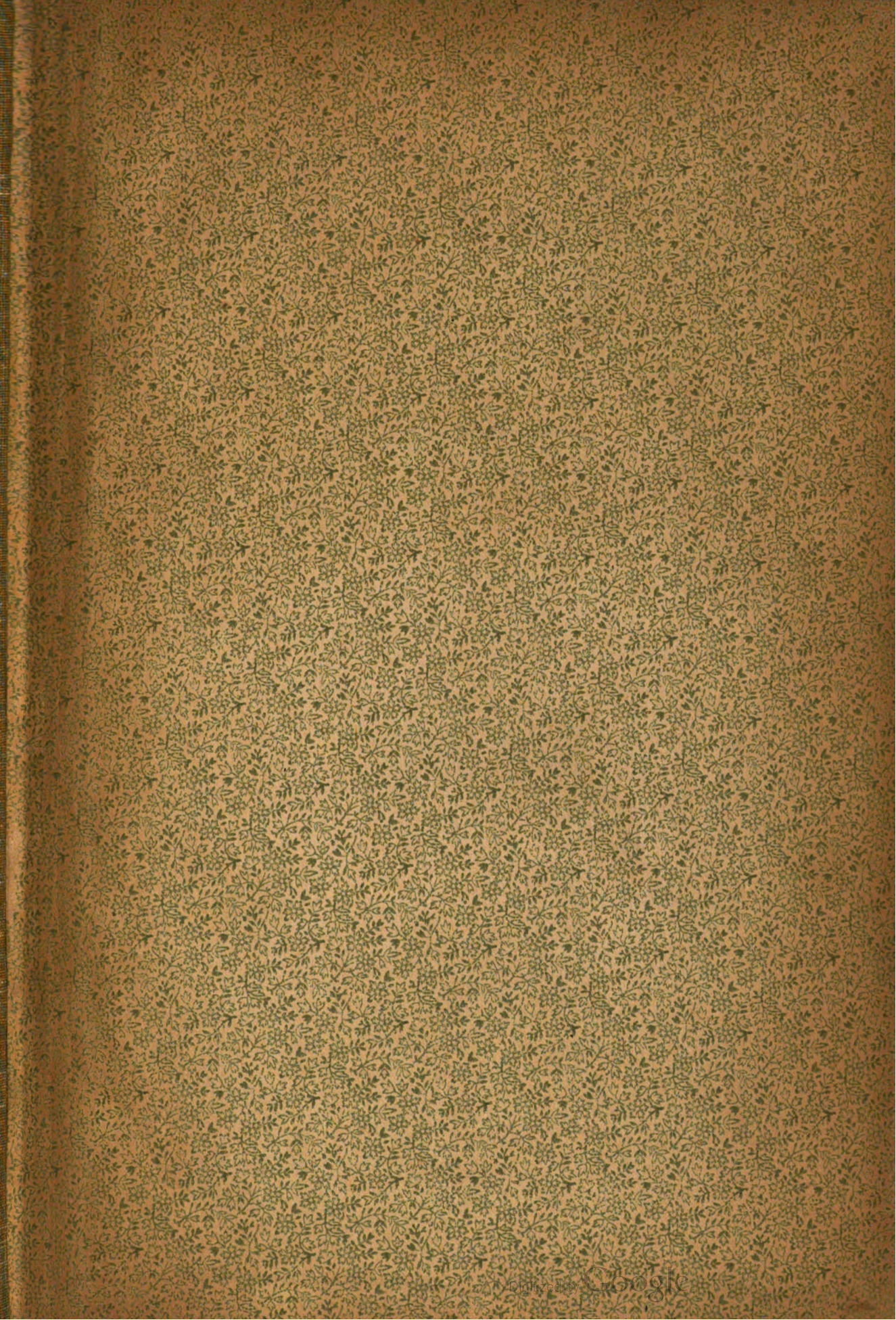
Columbia University
in the City of New York

3. ser

LIBRARY

v. 5





BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ INTERNATIONALE
DES
ÉLECTRICIENS.

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS ET C^o.

55533 Quai des Grands-Augustins, 55.

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ INTERNATIONALE
DES
ÉLECTRICIENS.

LA SOCIÉTÉ INTERNATIONALE DES ÉLECTRICIENS A ÉTÉ RECONNUE D'UTILITÉ PUBLIQUE LE 7 DÉCEMBRE 1886.

TROISIÈME SÉRIE.
TOME V. — ANNÉE 1915.



SIÈGE SOCIAL }
LABORATOIRE } 12 et 14, rue de Staël.
à Paris.

PARIS,
GAUTHIER-VILLARS ET C^{ie}, IMPRIMEURS-LIBRAIRES
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1915

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ INTERNATIONALE
DES
ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Compte rendu de la réunion mensuelle du 6 janvier 1915 : Allocution de M. le **Président**, p. 5.
— Admission de membres titulaires, p. 16. — Don à l'École supérieure, p. 16. — Appareil semi-automatique de visée et de tir sur buts mobiles (M. **Brocq**), p. 17.
OUVRAGES OFFERTS, p. 26.
IL Y A 30 ANS, p. 26.
RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES, p. 27.
BIBLIOGRAPHIE, p. 31.

COMPTE RENDU

DE LA
RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du mercredi 6 janvier 1915 ⁽¹⁾.

PRÉSIDENCE DE M. BRYLINSKI.

La séance est ouverte à 17 h 5 m.

ALLOCUTION DE M. E. BRYLINSKI.

« Mes chers Collègues, en ouvrant cette séance, dans laquelle nous allons faire effort pour examiner froidement quelques questions techniques, comme si la paix régnait de nouveau sur le monde,

⁽¹⁾ La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

je ne puis empêcher ma pensée de se reporter vers les tranchées où nos héroïques compatriotes exposent jour et nuit leur vie pour défendre la patrie contre des troupes innombrables de barbares envahisseurs.

» A vrai dire, ce n'est pas par accident que nous songeons à eux, et notre pensée ne les quitte guère. Quelles que soient nos préoccupations au cours de la journée, notre imagination nous reporte à chaque instant vers notre vaillante armée qui soulève depuis 5 mois l'admiration du monde entier. Je suis assuré d'interpréter votre sentiment unanime en lui envoyant avant toute chose un salut profondément ému et entièrement confiant.

» Et quand je parle de notre armée, j'associe dans mon esprit à nos compatriotes les armées de nos alliés : l'armée russe qui, après s'être si splendidement dévouée au mois d'août, bien avant d'avoir achevé sa concentration, pour desserrer un peu l'étau qui nous étouffait, n'a pas tardé à prendre une offensive magistrale, couronnée par des succès éclatants; l'armée de l'empire britannique, dont les soldats, accourus de tous les points de l'horizon au secours du droit violé, se sont montrés les dignes émules de leurs héroïques aînés; l'armée belge, énergique défenseur du sol national envahi malgré les engagements les plus formels, déployant le courage du lion; l'armée serbe qui, après deux guerres épuisantes, lutte avec une invincible énergie et un magnifique succès contre un ennemi de ressources décuples, et enfin, tout là-bas vers le soleil levant, l'armée nipponne, intervenue par respect de ses engagements vis-à-vis de l'empire britannique, qui a brisé dans l'œuf la puissance germanique en Asie. C'est la moitié du monde qui s'est levée en masse pour résister à la plus menaçante tentative d'hégémonie qui se soit produite depuis 2000 ans; c'est à tous ces soldats du droit et de la liberté des peuples que s'adresse le salut de la Société internationale des Électriciens.

» Rappellerai-je par quelles émouvantes péripéties a été traversée la période écoulée depuis notre dernière réunion? Ce fut d'abord l'ultimatum de l'Autriche à la Serbie, suivi de négociations activement menées pour la paix de l'Europe et brusquement arrêtées par l'Allemagne au moment même où elles paraissaient aboutir, la marche merveilleuse de notre mobilisation, la splendide

résistance de Liège coïncidant avec nos premiers succès en Alsace et en Lorraine, puis l'attaque foudroyante d'un torrent de forces tellement supérieures en nombre qu'il fallait avant tout éviter l'écrasement, Paris gravement menacé, et tout à coup, dans des conditions supérieurement choisies par notre commandement, la reprise de l'offensive, la victoire de la Marne, l'ennemi bloqué sur l'Aisne et arrêté net à bonne distance autour de Verdun, les opérations actives reportées graduellement, avec une admirable énergie et sans un échec sérieux jusqu'à la mer du Nord, le secours apporté en temps utile, à travers mille difficultés, à l'armée belge obligée d'évacuer Anvers, la résistance opiniâtre et pleine de succès à des attaques formidables de l'ennemi décidé à prendre Calais et à tourner notre aile gauche à tout prix, la reprise de l'offensive sur le front presque tout entier. La valeur incomparable de notre commandement et de nos troupes, éprouvée au creuset des plus graves difficultés, nous procure la plus entière confiance dans une victoire complète et définitive capable d'assurer le triomphe du droit sur la force pure et l'établissement d'une longue période de paix véritable; mais de quel prix ne sera pas payé, de quel prix n'a pas déjà été payé ce résultat.

» Après les efforts inlassablement poursuivis par de nobles esprits pour affermir le droit des gens dans les usages internationaux, après les conventions longuement discutées et finalement signées à La Haye par nos ennemis actuels, on était en droit d'espérer que la guerre, toujours terrible pour la partie combattante de la nation et pour les populations habitant les champs de bataille, toujours redoutable dans l'ensemble par ses répercussions inévitables, serait du moins empreinte d'un minimum d'humanité pour les non-combattants.

» Vous savez, hélas ! qu'il n'en a rien été. Les enquêtes instaurées n'ont que trop certainement établi jusqu'à quel degré nos ennemis, traitant comme des chiffons de papier les conventions librement débattues et acceptées par eux, ont usé de moyens de terreur et martyrisé, dans des conditions dont on ne pourrait retrouver l'équivalent que chez les Turcs du moyen âge, les malheureuses populations des régions qu'ils ont occupées.

» C'est avec un sentiment de profonde et pénible stupéfaction

que nous avons constaté, par le document qu'on a appelé le manifeste des intellectuels allemands, que ces violations de traités, ces cruautés répétées et souvent si atroces que la plume se refuse à les décrire, ont reçu l'approbation d'hommes occupant un rang éminent dans la science et dans l'art de leur pays, d'hommes qu'il y a six mois seulement nous supposions pénétrés du sentiment d'humanité exprimé depuis si longtemps par le poète, dans ce cri : *Homo sum et nil humani a me alienum puto.*

» Cette manifestation de la culture germanique dans laquelle la doctrine de la prééminence de la force brutale sur toute autre considération a amené la disparition de la notion de fait scientifique établi, a soulevé à juste titre dans le monde civilisé une réprobation générale, et je suis certain de répondre à votre sentiment unanime en associant la Société internationale des Électriciens à la protestation qu'elle a provoquée de la part de notre Académie des Sciences.

» A côté de la profonde sympathie que nous ressentons pour nos malheureux compatriotes des régions envahies et pour les citoyens de cette noble Belgique qui s'est levée tout entière à la voix de son roi et supporte les pires tourments pour défendre son honneur national, nous avons d'autres motifs de douloureuse émotion. La mort a déjà frappé à coups redoublés dans les rangs de nos collègues et de nos collaborateurs les plus immédiats.

Ce sont nos deux chefs de travaux de l'École supérieure, *Pierre Lebœuf* et *Edmond Millien*, qui apportaient à MM. Janet et Chauvat un concours particulièrement apprécié, tombés au champ d'honneur depuis de longues semaines déjà; ce sont nos collègues *Marcel Diot*, tué à l'ennemi le 26 septembre par une bombe jetée du haut d'un avion allemand après avoir été cité à l'ordre du jour du quartier général du 1^{er} corps d'armée pour sa belle conduite à la bataille du 23 août; *Paul Langumier*, tué dès le 22 août au combat de Ville-Houdlemont en accourant au secours de la Belgique; *Marcel Moulin*, maître de conférences de chronométrie à l'Université de Besançon; *Félix Robin*, métallurgiste qui nous avait donné d'intéressantes Communications; *Paul Reuss*, *Sauvêtre* et *H. Labour*, ancien élève de l'École, frère de notre Collègue du Comité; le fils de M. *E. Sartiaux*, le fils de M. *G. Sciamma*, et

enfin *Henri Bureau*, chef de travaux au Laboratoire central, qui nous avait communiqué d'importants travaux et dont la sympathique figure est encore si vivante dans nos esprits.

» L'École supérieure et le Laboratoire central sont, comme vous le voyez, durement frappés dans leurs collaborateurs les plus directs et ceux qui viennent de nous quitter méritent mieux que la brève mention qui vient d'en être faite.

» *Edmond Millien*, né le 23 octobre 1883, licencié ès sciences, avec les certificats de Physique générale, Calcul différentiel et intégral, Mathématiques générales, Mécanique physique et expérimentale, Mécanique rationnelle, ingénieur diplômé de l'École supérieure d'Électricité en 1908, avait à sa sortie de l'École passé plusieurs années en Allemagne où il avait acquis des connaissances pratiques étendues. En octobre 1911, il avait été rappelé à l'École, en qualité de chef de travaux chargé de la direction des essais de machines. Son activité, son ardeur au travail, son dévouement à l'École avaient rapidement eu l'influence la plus heureuse sur cette partie si importante de notre enseignement; les trois promotions d'élèves qui ont passé sous sa direction en conserveront certes le souvenir le plus ému et le plus reconnaissant.

» *Pierre Lebœuf*, né le 18 mai 1883, licencié ès sciences, avec les certificats de Mécanique rationnelle, de Physique générale, de Physique appliquée et Minéralogie, de Mathématiques générales, ingénieur diplômé de l'École supérieure d'Électricité en 1909, avait à sa sortie de l'École passé plusieurs années, sous la direction de notre Président d'honneur M. Blondel, à effectuer d'importantes recherches de laboratoire. Il était donc particulièrement bien préparé à revenir parmi nous, en octobre 1912, pour diriger les travaux de mesure à l'École. Esprit très scientifique et très fin, ayant le goût le plus vif pour le laboratoire et les méthodes expérimentales, il était d'un précieux secours pour nos élèves à qui il prodiguait ses conseils; il était très aimé et hautement apprécié. Ces deux pertes, à quelques jours d'intervalle, se feront longtemps sentir dans notre École.

» *Henri Bureau*, né le 17 août 1882, licencié ès sciences, avec les certificats de Mécanique rationnelle, de Physique générale, de Calcul différentiel et intégral, d'Astronomie, ingénieur diplômé

de l'École supérieure d'Électricité en 1907, était entré, à sa sortie de l'École, aux ateliers Thomson-Houston, où il avait fait un stage des plus profitables. Dès le 11 avril 1908, il revenait au Laboratoire central pour être attaché au service des essais de machines dont il devait devenir le chef en 1910. Plein d'activité et d'entrain, grand travailleur et ayant le travail facile, il était la vie de notre Laboratoire, auquel il a rendu les plus grands services. Secrétaire de la Société amicale des Anciens élèves de l'École, il avait grandement contribué à imprimer à cette Société une vive impulsion. Il est tombé, comme lieutenant d'Infanterie, le 27 novembre dernier, à Filkem (Belgique).

» Il est particulièrement pénible de voir tranchées dans leur fleur ces existences pleines de promesses, dont nous attendions tous une active coopération au progrès général, et c'est d'un cœur profondément attristé que nous adressons à leurs familles en deuil, avec notre vive admiration pour leur héroïque conduite, l'expression de la sincère part que nous prenons à leur douleur.

» Mais la funèbre liste n'est pas close, et la mort a frappé aussi ceux que leur âge ou d'autres motifs écartaient des champs de bataille. Nous avons encore à enregistrer la disparition de nos collègues *Ernest Boistel*, ingénieur expert, l'un de nos membres fondateurs que nous connaissions et apprécions tous; *D. Monnier*, professeur à l'École centrale des Arts et Manufactures, dont le solide enseignement a formé bien des générations d'ingénieurs et qui était, lui aussi, un de nos membres fondateurs; *A. Stroh*, de Londres, également membre fondateur de notre Société; *Jean Lautre*, *Boris Stahl*, tous deux ingénieurs diplômés de l'École supérieure d'Électricité, et *Raoul Valensi*, lieutenant de vaisseau. Ces pertes sont cruelles pour notre Société et j'adresse en son nom nos plus sincères condoléances aux familles de ces collègues disparus.

» Il vous intéressera sans doute de connaître dans ses traits principaux l'existence de la Société, de l'École et du Laboratoire au cours des cinq derniers mois.!

» Dès la proclamation de la mobilisation, nous avons mis à la disposition du Ministre de la Guerre nos locaux et notre matériel. Puis, sur l'initiative de notre Président d'honneur, M. André

Blondel, nous avons cru pouvoir nous rendre utiles en organisant un véritable service de placement pour les ingénieurs et agents privés de situation par la guerre et susceptibles d'entrer temporairement avec fruit dans des entreprises que la mobilisation avait privées d'une partie de leur personnel et qui devaient néanmoins assurer la marche de véritables services publics ou d'intérêt public.

» Après nous avoir mis en rapports avec les Syndicats professionnels de l'Électricité, qui avaient déjà entrepris une tâche analogue, ainsi qu'avec le Comité des Houillères de France, nous avons, dès le 25 août, adressé à tous nos collègues la circulaire suivante :

« Je suis certain de répondre au sentiment unanime de tous nos
» Collègues en vous informant que nous nous sommes préoccupés
» de chercher la manière la plus efficace dont notre Société pourrait apporter son concours à la défense nationale dans les graves
» circonstances que nous traversons. Un très grand nombre des
» nôtres sont déjà mobilisés ; mais parmi ceux qui restent se rencontrent évidemment des aptitudes très variées qu'il convient
» de coordonner et d'utiliser au mieux des intérêts du pays.

» Or, par suite de la mobilisation, et malgré les sursis temporaires d'appel accordés par l'autorité militaire à certains agents dont le maintien à leur poste se trouvait plus utile à la défense nationale que l'envoi sous les drapeaux, quelques entreprises de distribution d'énergie électrique ou de construction de matériel de guerre ont pu se trouver gênées dans leur exploitation, de même que quelques mines de charbon ou entreprises métallurgiques pour leur service électrique.

» La plupart de ces entreprises coopèrent efficacement à la défense nationale et doivent être maintenues en activité. Par contre, d'autres usines vont se trouver à bref délai dans l'obligation de réduire leur production dans une large mesure. De là résultera la création d'un personnel disponible, qui pourrait être utilement employé à combler les vides dans les usines dont le fonctionnement ne saurait être suspendu, et peut-être même à laisser partir pour l'armée une partie du personnel mis en sursis d'appel.

» Pour obtenir ce résultat il suffit de mettre en rapport le personnel disponible avec ceux qui en ont besoin : notre Président d'honneur, M. Blondel, et ceux des membres du Bureau qui sont encore à Paris ont pensé que notre Société pourrait utilement remplir cette mission.

» A vrai dire, d'autres groupements ont déjà pris pareille initiative; mais si ces groupements comptent des membres qui font également partie de notre Société, ils sont loin de réunir tous nos collègues, de telle sorte que l'œuvre entreprise par notre Société non seulement ne fera pas double emploi avec celles qui se développeront d'autre part, mais encore marchera d'accord avec elles.

» Nous prions, en conséquence, tous ceux de nos Collègues qui auraient du personnel disponible ou seraient eux-mêmes disponibles, et tous ceux qui auraient besoin de personnel de remplacement pour la durée de la guerre, de donner les indications nécessaires à M. Paul Janet, directeur du Laboratoire central et de l'École supérieure d'Électricité, 14, rue de Staël, à Paris, qui veut bien se charger d'ouvrir un registre d'inscriptions et d'assurer les communications nécessaires entre ceux qui, momentanément sans emploi, désirent travailler et ceux qui désirent, au contraire, trouver du personnel pour combler temporairement des vides, tous avec la conscience de travailler en dernière analyse pour la défense nationale; d'ailleurs, pour que cette organisation puisse rendre les services qu'on est en droit d'en attendre, il importe que les demandes qui nous seront adressées soient aussi précises et aussi détaillées que possible (aptitudes professionnelles, catégories de services demandés, etc.).

» Veuillez agréer, etc. »

» A la suite de cette circulaire, un certain nombre de nos Collègues ou même de personnes étrangères à la Société se sont adressés à nous pour offrir leurs services. 81 demandes nous sont arrivées dont 57 pour des situations d'ingénieurs, 3 de contremaîtres, 15 d'ouvriers et 6 divers (comptables, dessinateurs, etc.). Nous avons pu placer six ingénieurs et un comptable. Le rendement, certes, n'a

pas été fort élevé; mais étant données les circonstances, nous devons nous estimer satisfaits du résultat obtenu.

» Les locaux du Laboratoire et de l'École que nous avons offerts au service de santé militaire n'ont pas été agréés par ce service, comme ne convenant pas à l'installation d'une ambulance. En revanche ils ont été réquisitionnés vers le début de septembre par les services de l'intendance du Camp retranché de Paris; cette réquisition n'a pas eu de suite.

» Par contre, l'offre que nous avons faite à la direction du Génie de mettre à sa disposition toute la partie de notre matériel qui pourrait lui être utile a été largement mise à contribution, en particulier par les services de la télégraphie sans fil, et une assez grande quantité de nos machines et appareils ont quitté nos locaux contre reçus ou bons de réquisitions réguliers.

» Dans le courant du mois d'août, notre personnel administratif a prêté son concours à la mairie du XV^e arrondissement pour l'établissement des listes de secours aux familles des mobilisés. Nous avons également mis nos ressources de bureau à la disposition de la Commission supérieure des Inventions du Ministère de la Guerre dont font partie MM. P. Janet et Chaumat, ce dernier en qualité de secrétaire.

» 17 membres de notre personnel du Laboratoire et de l'École ont été mobilisés dès le commencement des hostilités.

» Malgré la brusque désorganisation qui en est résultée, le Laboratoire central n'a pas fermé ses portes un seul jour. Comme on pouvait s'y attendre, les essais ont été peu nombreux au début; ils reprennent graduellement comme l'indiquent les résultats suivants :

Mois.	Nombre d'essais.	Montant des factures d'essais survenus depuis la déclaration de la guerre.
Août	10	0,00
Septembre	10	118,60
Octobre.....	125	1099,60
Novembre.....	55	1297,15
Décembre (du 1 ^{er} au 25)	75	4329,688
	275	6845,038

» Nous faisons tous nos efforts pour développer et accroître le nombre de ces essais.

» A l'École la situation était plus difficile encore, et votre Bureau a longuement discuté l'opportunité de la réouverture, malgré une promotion nécessairement fort réduite. Nous nous sommes résolus néanmoins à cette réouverture, malgré les sacrifices considérables qu'elle entraîne, pensant qu'il était du plus haut intérêt pour l'École de ne pas interrompre son activité même pendant cette période troublée. La promotion se compose de 15 élèves parmi lesquels deux ingénieurs belges de l'Université de Gand que nous avons admis à suivre notre enseignement. S'il a fallu s'adapter aux circonstances et modifier sensiblement les méthodes antérieurement en usage, toutes les mesures ont été prises pour maintenir le niveau de l'enseignement, et vous pouvez être assurés que cette année tout à fait exceptionnelle contribuera à asseoir encore le renom de l'École supérieure d'Électricité.

» Le maintien de l'enseignement de l'École, malgré la faiblesse numérique de la promotion, entraînera une perte pécuniaire importante. Grâce à la précaution prise depuis plusieurs années de constituer des réserves, précaution dont nous devons principalement remercier notre trésorier honoraire M. Violet, les difficultés financières n'influeront pas d'une manière inquiétante sur la situation de la Société, et, à moins que la durée de la guerre ne dépasse les évaluations les plus pessimistes, la Société est assurée de traverser sans encombre ce difficile défilé.

» Mais, pour arriver avec certitude à ce résultat, il nous a fallu demander au personnel de la Société, de l'École et du Laboratoire des sacrifices qu'il a consentis avec une louable abnégation. Après avoir maintenu jusqu'à la fin de l'année dernière la plus grande partie des traitements antérieurs, nous avons dû à partir du 1^{er} janvier opérer des réductions sur tous ceux des traitements qu'on ne pouvait pas considérer comme incompressibles, de telle sorte que le personnel fait face à une tâche en partie nouvelle et par conséquent plus pénible avec une moindre rémunération. Je ne saurais trop remercier ce personnel de la bonne volonté avec laquelle il a accepté cette situation et du dévouement qu'il ne cesse de montrer, suivant ainsi l'exemple quotidiennement donné par MM. Janet,

Chaumat et Durand, qui ont grandement augmenté depuis cinq mois les titres déjà si importants qu'ils avaient antérieurement acquis à notre reconnaissance.

» Nous avons dû également parer à l'absence forcée de notre sympathique secrétaire général, M. L. Joly, qui remplit, lui aussi, son devoir à l'armée. Nous avons fait appel dans ce but au dévouement de notre secrétaire du Comité, M. Sabourain, qui a bien voulu accepter de remplir par intérim ces fonctions si complexes et si nécessaires avec le concours bienveillant de notre ancien président, M. Picou, de notre vice-président, M. Guilbert, qui nous apporte depuis le début des hostilités un concours très actif et extrêmement précieux dont je suis heureux d'avoir ici la possibilité de le remercier tout particulièrement, et de M. P. Janet, toujours prêt à rendre service à la Société.

» C'est dans ces conditions que votre Bureau a pensé pouvoir rendre à la Société une vie aussi normale qu'il est possible dans les circonstances présentes, et reprendre le cours des séances mensuelles. Nos réunions auront lieu jusqu'à nouvel avis dans la salle des séances de la Société de Physique, en raison de l'indisponibilité actuelle de notre salle ordinaire, transformée en ouvroir.

» Ce voisinage ramène invinciblement notre pensée vers l'armée qui là-bas, du Nord à l'Est, sur un front d'une invraisemblable étendue, supporte stoïquement le froid, l'eau, le fer et le plomb, et accumule les actes héroïques pour débarrasser la Patrie des agresseurs qui prétendaient l'asservir. Aujourd'hui le pays tout entier n'a plus qu'une seule âme, confondue avec celle de l'armée en laquelle il a mis sa confiance la plus complète, et c'est en harmonie avec tous nos compatriotes, en témoignage de notre foi absolue dans le succès final que je vous invite à crier avec moi : « Vive la France ! Vivent ses alliés ! » (*Acclamations.*)

Le procès-verbal de la dernière réunion mensuelle est adopté. MM. P. Janet et Chaumat, retenus à la Commission des Inventions, M. J. Blondin, malade, et M. de Baillehache, en service sur le front de guerre, se font excuser de ne pas assister à la séance.

Il est donné connaissance des Ouvrages offerts (*voir p. 26*),

d'un don pour l'École supérieure d'Électricité et des demandes d'admission suivantes :

MM.

Broussouse (Fernand-Louis), Ingénieur aux Ateliers de Constructions électriques du Nord et de l'Est de Jeumont, à Jeumont (Nord). — Présenté par MM. Perret et E. André.

Crozot (Aimé), Directeur général de la Compagnie continentale pour la Fabrication des Compteurs, 9, rue Pétreille, à Paris. — Présenté par MM. Lacaze et A. Cornuault.

Haffner (Paul-Louis-Émile), Ingénieur à la Société de Distribution d'Électricité de l'Ouest, 7, place de Bretagne, à Rennes (Ille-et-Vilaine). — Présenté par MM. Janet et Chaumat.

Laforest (Léon), Directeur de la Compagnie française de Tramways et d'Éclairage électrique de Shanghai, à Lokawey (Chine). — Présenté par MM. Brylinski et Sabourain.

Patriciu (Neculai), Chef des Travaux au Laboratoire de l'Institut électrotechnique de l'Université de Jassy, rue 40 Sînti, n° 7, à Jassy (Roumanie). — Présenté par MM. Janet et Sirghi.

Ces candidats sont élus membres titulaires de la Société internationale des Électriciens.

Des remerciements sont adressés à M. R.-V. Picou pour un don de 100 fr qu'il a fait à l'École.

L'ordre du jour appelle la Communication technique.

APPAREIL SEMI-AUTOMATIQUE DE VISÉE ET DE TIR SUR BUTS MOBILES.

M. A. Brocq. — « Je rappellerai d'abord que le problème dont l'appareil doit donner la solution consiste à déterminer la direction à donner au plan vertical passant par l'axe d'une bouche à feu et dans ce plan l'inclinaison de cet axe sur l'horizontale pour que le projectile atteigne le but mobile invisible pour les servants.

» L'appareil présenté ici est particulièrement applicable au tir des batteries de côtes sur buts mobiles se mouvant dans un plan horizontal. Ce système est basé sur l'emploi de deux postes de visée constituant les extrémités d'une base fixe, mais il présente ce trait particulier d'être pour ainsi dire automatique, en ce sens qu'il permet la visée directe en hauteur et en direction, y compris les corrections dues à la distance et à la vitesse du but.

» Il permet en somme d'exécuter les tirs sur buts mobiles suivant les mêmes règles et principes que le tir sur buts fixes, c'est-à-dire le système de la fourchette. Cela vient de ce que les appareils maintenant constamment la pièce dans la même situation relative par rapport au but, on peut pour chaque tir corriger leur action d'après les résultats du tir précédent.

» Le principe consiste à installer de part et d'autre de la pièce des miroirs V_1 , V_2 (*fig. 1*) dont les axes verticaux passent par les points homothétiques des axes verticaux P_1 , P_2 des lunettes de visée par rapport à celui de la pièce.

» De ces miroirs V_1 , V_2 émanent des rayons lumineux décalés en avant par rapport aux axes des lunettes de visée d'angles proportionnels à la vitesse angulaire du but vu de chacun des points de visée et fonctions de la distance de ce but à la batterie. Il en résulte que le point de croisement des rayons V_1r , V_2r détermine avec l'axe vertical de la pièce un plan de tir qui passe en avant du but R_0 . Il coupera le but si les corrections angulaires sont bonnes. Dans ce plan le projectile suivra une trajectoire qui y sera orientée au moyen d'une courbe empirique tracée à l'avance dont la forme dépend uniquement des caractéristiques de la pièce.

» On verra dans le détail de la description comment s'obtiennent ces corrections en direction et en hauteur.

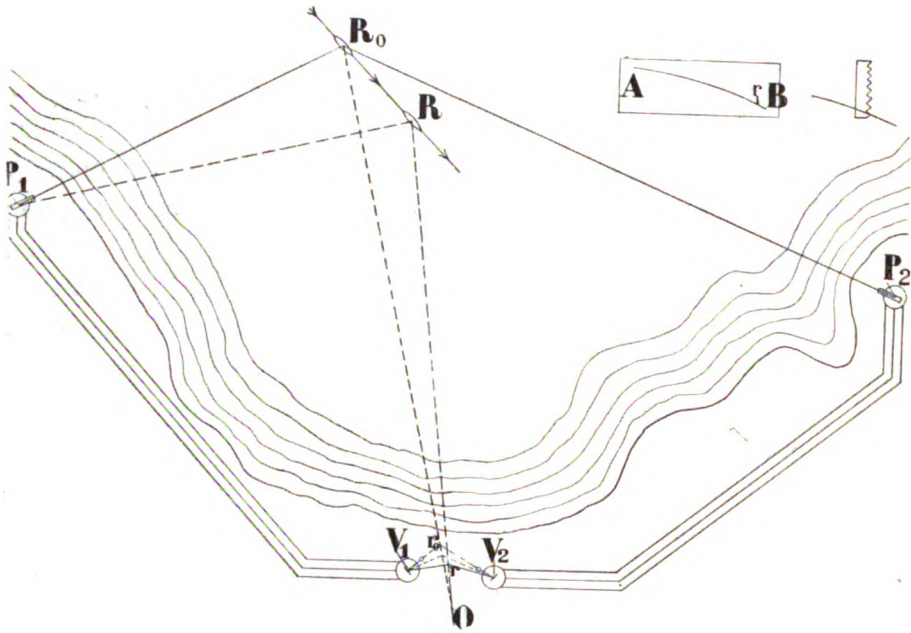


Fig. 1.

» Les appareils dont l'ensemble conduit à la réalisation du programme exposé ci-dessus sont les suivants :

» A chacun des postes de visée P_1 (fig. 2), P_2 une lunette Z munie de réticules est mobile autour d'un axe vertical au moyen d'une vis sans fin commandant aussi un curseur C_1 se déplaçant sur une résistance circulaire R_1 . Toutes les précautions sont prises pour que la lunette puisse suivre aisément et sans à-coups le mouvement du but mobile. La résistance R_1 est reliée par deux fils à une résistance semblable R'_1 (fig. 3) située au poste répéteur de la batterie. Le curseur C_1 est relié lui-même à un curseur C'_1 semblable, se déplaçant sur la résistance R'_1 . Les deux résistances et les lignes forment un pont de Wheatstone. Les curseurs sont les prises de la branche du galvanomètre, remplacé ici par un moteur spécial M'_1 au poste répéteur.

» S'il s'agissait uniquement de repérer sur la carte de batterie le point visé, il suffirait que les appareils répéteurs ou récepteurs

comportassent chacun une aiguille restant constamment parallèle

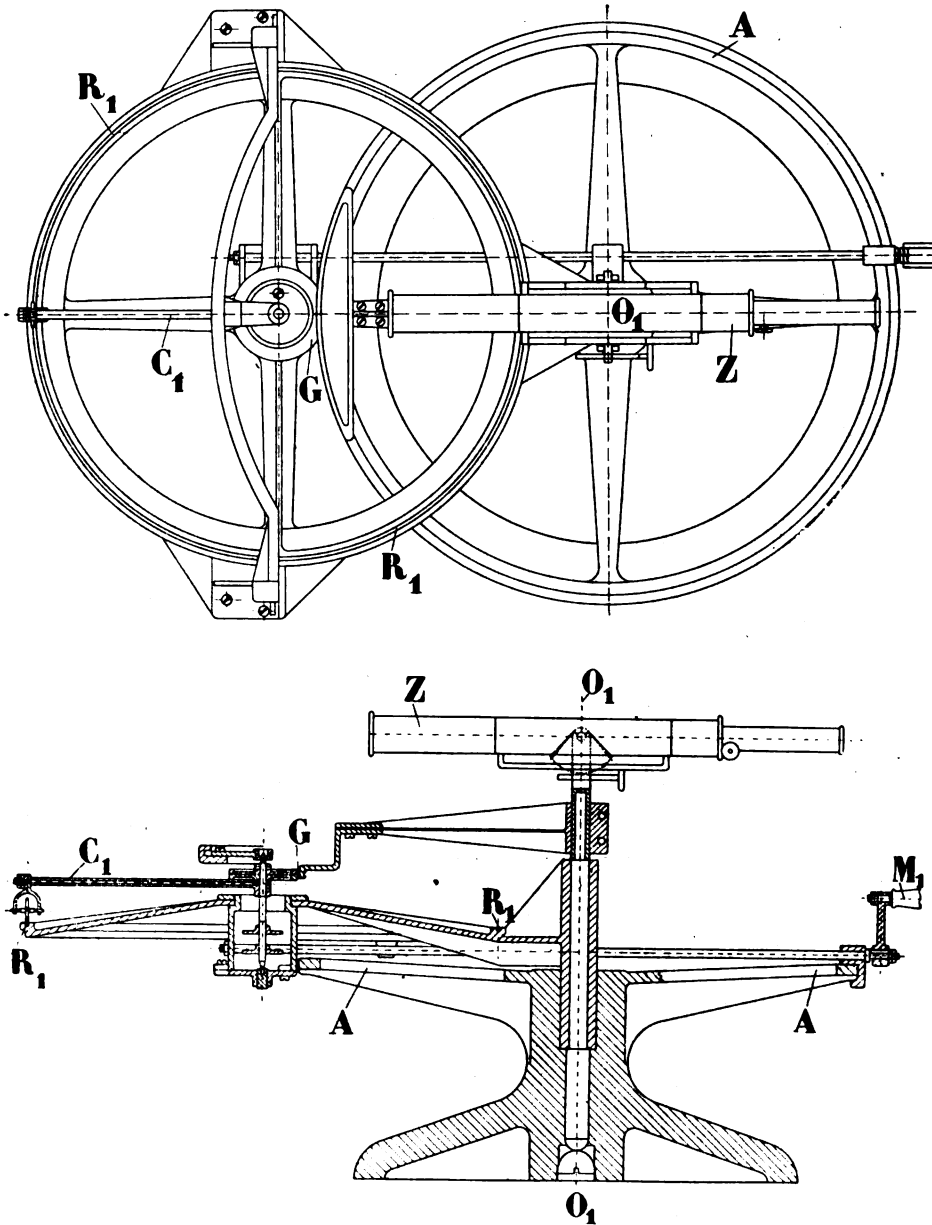


Fig. 2.

à la lunette de visée correspondante pour que le croisement de ces aiguilles indique sur la carte le point visé.

» Le problème envisagé n'est pas aussi simple, car les lunettes de visée donnent la situation actuelle du but, tandis que la pièce

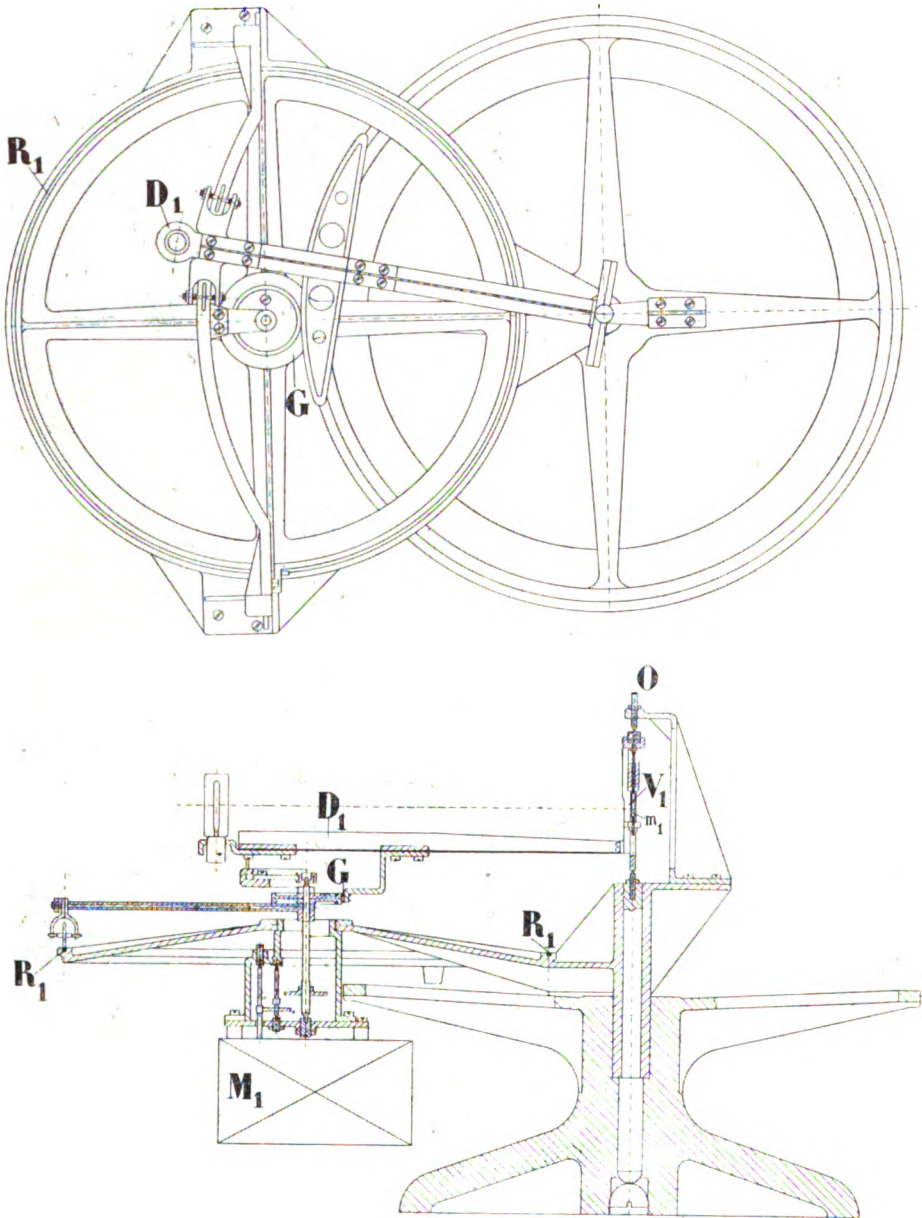


Fig. 3.

doit être dirigée sur le point qu'occupera ce but au moment de l'arrivée du projectile.

» Pour tenir compte de cette nécessité, l'appareil répéteur fonctionne de la manière suivante :

» Un voltmètre V_1 mesure la différence de potentiel entre les curseurs C_1 du poste observateur et C'_1 du poste répéteur ou, ce qui revient au même, est branché aux bornes des moteurs M_1 . Ce voltmètre porte un miroir m_1 éclairé par une source lumineuse portée par le bras D_1 perpendiculaire à l'état de repos au plan du miroir et située dans le voisinage de son foyer; le faisceau réfléchi est un faisceau parallèle et fait en marche avec D'_1 un angle double de la déviation du voltmètre V_1 .

» Le mouvement du bras D_1 est solidaire de celui de la lunette; celui du bras D'_1 est obtenu par le moteur M'_1 fonctionnant sous la différence de potentiel entre C_1 et C'_1 , différence de potentiel qui produit la déviation du voltmètre V'_1 . Si donc l'observateur déplace sa lunette avec une vitesse angulaire α'_1 égale à celle du but, il déséquilibre le pont; le bras porte-lampe D'_1 du poste répéteur est entraîné par le moteur M'_1 et suit le mouvement de la lunette Z , mais toujours avec le décalage α'_1 . Le miroir de voltmètre aura pivoté d'un angle demi β'_1 proportionnel à α'_1 . Le rayon réfléchi fera donc avec le bras porte-lampe un angle $\beta'_1 = K\alpha$ en avance sur l'axe de la lunette de visée. Le facteur K dépend de la position du but à chaque instant.

» Si les deux lunettes de visée suivent d'une façon régulière le but mobile R , les bras porte-lampe D_1 et D'_1 le suivront également à la batterie avec un retard α'_1 et α'_2 , et si ces deux bras ont leurs axes sur la carte de la batterie aux points précis qui représentent les axes des lunettes de visée, les rayons réfléchis se croiseront non sur la position actuelle du but, mais sur ce qu'elle sera au bout d'un certain temps t . Les constantes de l'appareil seront telles que ce temps t soit celui que le projectile met à atteindre le but; dans ce cas le point de croisement des rayons lumineux sera la représentation sur la carte du point visé.

» On peut obtenir cette visée directement sur la pièce. Supposons que les deux voltmètres V_1 , V_2 soient situés de part et d'autre de la pièce dans des positions homothétiques à celles qu'occupent les postes de visée par rapport au pivot de pointage en direction de la pièce.

» Si, au-dessus de la pièce et dans le plan vertical de son axe est placée une feuille verticale translucide, la pièce sera pointée en direction lorsque les deux rayons lumineux se couperont dans le plan de cette feuille. Le pointage en hauteur sera obtenu au moyen d'une ligne empirique tracée à l'avance et qui sera amenée sur l'extrémité supérieure, par exemple, de l'image commune des deux spots lumineux émanant des deux voltmètres.

» Les corrections du tir en direction se feront en manœuvrant des rhéostats placés en série avec les voltmètres qui modifieront les angles d'avance des rayons lumineux, soit en agissant sur le voltage de la source.

» Les corrections en hauteur s'obtiendront par modification du point d'intersection de la fente lumineuse avec la ligne empirique de visée.

» Cette solution ne peut être appliquée en pratique à cause de la disposition des batteries. Elle exigerait autant de systèmes

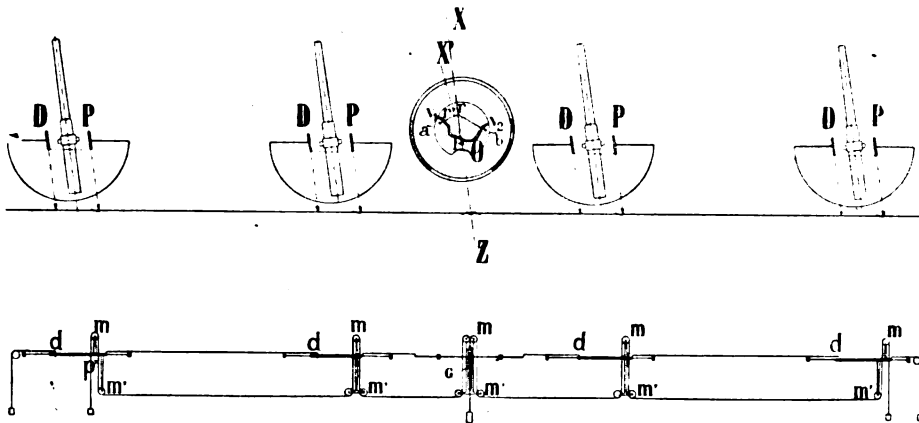


Fig. 4.

récepteurs que de pièces. Il a paru préférable d'avoir un seul organe de visée par batterie, de façon à le pouvoir mettre dans les meilleures conditions de fonctionnement et de sécurité.

» Le système complet sera placé dans une casemate spéciale unique pour chaque batterie, analogue à la tourelle de commandement d'un cuirassé et permettant la vue du champ commandé par la batterie.

» Les mouvements de la règle translucide (*fig. 4*) seront transmis en

direction et en hauteur à des buts fictifs convenablement mobiles (deux par pièce), l'un pour le pointage en direction, l'autre pour le pointage en hauteur que les pointeurs n'auront qu'à suivre avec leurs lunettes vers l'arrière.

» Les positions angulaires de cette règle par rapport à l'horizontale étant en relation directe avec la distance du but, ce sont les variations de cet angle qui introduisent ou retirent dans le circuit des voltmètres les résistances convenables pour déterminer la déviation correcte de ces appareils, c'est-à-dire pour multiplier par la distance du but les angles fournis par la correction de vitesse angulaire.

» Avant de quitter la tourelle des répétiteurs, remarquons qu'une lunette dont l'axe suit le mouvement du plan OX a été prévue pour répondre à une objection assez sérieuse qui a été faite à l'emploi de deux postes de visée et a été une des causes principales de leur abandon malgré les avantages de précision que donnait l'emploi d'une grande base. Il arrivait souvent que les observateurs des postes de visée ne suivaient pas le même but et que par suite leurs indications n'avaient plus aucune valeur sans que rien puisse les avertir de leur erreur; avec le système que je présente, il suffira de doubler momentanément la résistance des deux voltmètres de correction pour que, leur déviation étant réduite de moitié, les deux rayons lumineux viennent se croiser sur un point r' tel que OX' passera par la position actuelle du but qui sera alors visible dans la lunette, dans le voisinage de son centre. Si les observateurs ne suivaient pas le même but, rien n'apparaîtrait au réticule de la lunette et le directeur du tir pourrait en aviser les observateurs.

» Signalons aussi en passant que, si la carte de la table de tir porte l'indication des mines fixes de la défense sous-marine, la vérification dont nous venons de parler permet de constater le passage du vaisseau ennemi à proximité de ces mines et, par suite, de les mettre utilement en action.

» *Coordination des opérations.* — Pour que les résultats soient bons, il faut que les opérateurs soient d'accord et sûrs de leur action au moment où la pièce devra être mise à feu.

» Ce résultat devant être atteint par des opérateurs éloignés

les uns des autres, on doit prévoir une sorte de block-system qui ne permette pas de fausses manœuvres. La pièce ne pourra donc être mise à feu que :

» 1^o Si les viseurs des postes de visée suivent bien le but ;
» 2^o Si les opérateurs de la casemate font coïncider exactement leurs spots ;

» 3^o Si les pointeurs de pièce suivent correctement le but fictif ;

» 4^o Si le commandant de la batterie l'ordonne.

» 1^o Pour cela les viseurs des postes de bases ont sous leurs mains les interrupteurs en série sur les lampes qui ne sont allumées que si les deux viseurs trouvent leurs visées bonnes ;

» 2^o Une sonnerie ou tout autre signal continu est mis en route par trois interrupteurs en série sous la main du commandant et des deux opérateurs de la casemate ; le tir ne doit avoir lieu que si le signal se fait entendre, ce qui exige la fermeture simultanée des trois interrupteurs ;

» 3^o Les pointeurs, deux pour chaque pièce, un pour la direction, l'autre pour la hauteur, commanderont chacun une gâchette sur laquelle ils ont consigne de n'agir que si la sonnerie marche et si leur visée sur le but fictif (repère) est bonne ; la pièce ne sera mise à feu que si les deux gâchettes sont en action simultanée.

» Par tout ce qui précède on se rend compte qu'il suffit que les appareils restent comparables à eux-mêmes pendant toute la durée relativement faible d'un tir pour que l'on puisse rigoureusement appliquer au tir sur buts mobiles les méthodes employées sur buts fixes, c'est-à-dire le système de la fourchette.

» Autrement dit, l'observation d'un coup l'ayant montré trop à droite et trop long dans le cas de la figure 1, il suffira de diminuer le voltage de la source pour diminuer les deux angles de correction et ramener le plan de visée sur la gauche si en même temps on diminue l'inclinaison de la pièce sur l'horizontale en amenant la ligne visée à couper le spot lumineux un peu au-dessous de son extrémité supérieure, les lunettes n'ayant pas cessé de suivre le but dans son mouvement ; le coup suivant devra être trop court et à gauche en coupant en deux la correction ; le troisième coup devra être dans le but.

» C'est en vue d'obtenir ce résultat que les appareils que nous

venons de décrire sommairement ont été étudiés; le calcul de leurs éléments permet de les croire réalisables dans des conditions de sensibilité et d'exactitudes suffisantes.

» Sans entrer dans le détail, nous dirons seulement que dans l'appareil (représenté aux figures), les roulettes de rhéostats parcourent la circonférence de celui-ci, c'est-à-dire ses 8100 touches pour un déplacement de 45° de la lunette de visée, chaque touche correspondant à 20 secondes d'arc et à une différence de potentiel de 0,02 volt. Le moteur, compensé d'ailleurs pour tous les frottements du mécanisme, devra être sensible à cette différence.

» Ces appareils n'ont pas été exécutés, mais la construction, bien que délicate, ne paraît pas impossible. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Brocq de sa Communication très intéressante par elle-même, et à laquelle les circonstances présentes donnent un intérêt encore plus grand. Les dispositions imaginées et soigneusement perfectionnées par M. Brocq sont extrêmement ingénieuses et l'on ne peut que souhaiter qu'elles obtiennent la sanction de l'essai réel.

La séance est levée à 18 h.

LISTE DES OUVRAGES

OFFERTS A LA SOCIÉTÉ INTERNATIONALE DES ÉLECTRICIENS.

(Suite.)

**La Bibliothèque est ouverte aux Membres de la Société, tous les jours
de 3 heures à 6 heures, excepté les dimanches et jours de fêtes,
14, rue de Staël.**

France.

- Cours d'Électricité industrielle. Le courant continu. L'éclairage électrique*, par FRANZ MAGONETTE. Paris, Dunod et Pinat, 1914; 1 vol. in-8°, cartonné toile. (*Don des éditeurs.*)
- Dictionnaire juridique de l'industrie électrique*, par ÉTIENNE CARPENTIER. Paris, Dunod et Pinat, 1914; 1 vol. in-8°, broché. (*Don des éditeurs.*)
- Données numériques d'électricité, de magnétisme et d'électrochimie.* (Extrait du Volume III des *Tables annuelles de Constantes et Données numériques de Chimie, de Physique et de Technologie*, publiées par C. MARIE. Paris, Gauthier-Villars, 1914; 1 vol. grand in-4°, cartonné. (*Don de l'auteur.*)
- Guide juridique et administratif des entrepreneurs de distribution d'énergie électrique.* Documents officiels et Commentaires par CH. SIREY; 2^e édition, entièrement refondue. Paris, Syndicat professionnel des Usines d'électricité, 1914; 1 vol. in-8°, broché. (*Don du Syndicat professionnel des Usines d'Électricité.*)
- Répertoire des Industries gaz et électricité* (édition 1914), par MAURICE GERMAIN. Paris, chez l'auteur, 1914; 1 vol. in-16, cartonné toile. (*Don de l'auteur.*)
- Téléphonie (La) et les autres moyens d'intercommunication dans l'industrie, les mines et les chemins de fer*, par P. MAURER. Paris, Dunod et Pinat, 1914; 1 vol. in-8°, broché. (*Don des éditeurs.*)
-

IL Y A TRENTE ANS.

Janvier 1885. — Le dromoscope, par M. le Commandant FOURNIER. — Le compteur d'électricité, par M. G. LIPPMANN. — De l'évaluation mécanique des courants électriques employés en médecine, par M. le Dr BOUTET DE PÀRIS.

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES.

La distribution de l'énergie électrique (Rapport du Sous-Comité de la distribution) (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, février 1914).

Ce Rapport expose ce qui, dans la pensée de ses auteurs, est la bonne pratique industrielle, en matière de distribution d'énergie électrique pour tous objets. Après avoir constaté la tendance à se centraliser, que manifeste la production de l'énergie, il souhaite de voir centraliser aussi la distribution par de grandes sous-stations judicieusement placées. Le Rapport se termine par un index bibliographique et est suivi des neuf appendices suivants :

I. *La distribution du courant continu à trois fils*, par Ph. TORCHIO. — Ce système de distribution comprend un réseau à trois fils dont le neutre est mis à la terre, alimenté en certains points par des feeders partant d'une sous-station. En Amérique, les conducteurs ne sont pas enfouis directement dans la terre, mais posés dans des caniveaux spéciaux. Le service des sous-stations est devenu très simple, car les nouvelles commutatrices avec pôles de commutation, frotteurs de graphite, collecteurs fendus, frotteurs lubrifiants sur les bagues, n'exigent aucune surveillance. On rencontre maintenant des commutatrices de 4000 kW et les constructeurs sont prêts à fournir des unités plus puissantes encore. Les transformateurs sont le plus communément du type ventilé; il est adroit de brancher directement le ventilateur aux bornes secondaires du transformateur pour qu'il se mette en marche dès que le transformateur est sous tension. Des batteries de réserve sont fréquemment installées, leurs éléments ont souvent des plaques très fines de façon à pouvoir donner un grand débit dans un temps très court, fournissant en 10 minutes par exemple, toute la charge de la sous-station.

II. *Distribution par courant alternatif*, par H. B. GEAR. — L'auteur examine les différentes manières d'alimenter les sous-stations; en Amérique, le système « rayonnant » avec câbles de secours transversaux de sous-station à sous-station est le plus en faveur. Les câbles sont placés dans des conduits souterrains, la capacité de chaque câble est à peu près de 3000 à 4500 kW; grâce à des relais à retour de puissance, on peut placer les câbles en parallèle. Les sous-stations, tantôt abaissent la tension, tantôt transforment l'alternatif en continu par convertisseur tournant, tantôt changent la fréquence, tantôt changent le triphasé en diphasé ou vice versa par transformateurs Scott. Les transformateurs de moins de 1000 kW sont généralement à huile, et les plus grosses unités à ventilation forcée ou à refroidissement d'eau. Les perfectionnements récents dans la construction des transformateurs ont considérablement abaissé leur prix qui finit par ne pas surpasser le prix de l'appareillage. L'emploi des régulateurs d'induction pour maintenir constante la tension devient général. Les bâtiments sont entièrement incombustibles. La distribution en courant alternatif se fait presque partout en Amérique à 2200 V; la tension est abaissée chez l'abonné à 220 ou 110 V. Dans la distribution à basse tension, les secondaires des transformateurs sont, lorsque cela est possible, connectés entre eux : cela permet de diminuer les frais de premier établissement quand on ne peut combiner les charges de plusieurs consommateurs. Dans les districts très denses, la difficulté de transporter à quelque distance

de gros courants alternatifs rend parfois avantageuse la transformation en courant continu. Les distributions de courant alternatif sont le plus souvent aériennes, sauf dans les districts denses où l'on peut faire les frais de canalisations souterraines coûtant alors de 3 à 5 fois plus cher que les canalisations aériennes.

III. *Influence des appareils d'utilisation*, par H. GOODWIN. — L'auteur envisage les questions ayant trait aux moteurs (courant de démarrage, facteur de puissance), aux différentes applications privées de l'électricité, parmi lesquelles les applications à la télégraphie sans fil lui semblent les plus indésirables pour les réseaux, à l'équilibrage des charges chez les clients alimentés par des circuits polyphasés.

IV. *Distribution de courant continu pour les tramways urbains*, par R. H. RICE. — L'auteur examine successivement : les sous-stations, le système d'alimentation (positif) et le système de retour (négatif). — *Sous-stations* : Elles sont maintenant toutes faites sur le même plan; on omet souvent d'y mettre un pont roulant, les machines modernes n'ayant jamais besoin que de réparations de peu d'importance. Elles sont presque toujours alimentées par du triphasé à 25 périodes, l'emploi des commutatrices est universel; celles-ci fournissent du courant à 600 V, sont compoundées, et dans les modèles récents, munies de pôles de commutation; les nouvelles commutatrices de 4000 kW ne sont pas sensiblement plus encombrantes que celles de 2000 kW. Les interrupteurs et les disjoncteurs sont actionnés au moyen de solénoïdes ou de petits moteurs par du courant continu à basse tension venant d'une batterie. Le facteur de puissance des commutatrices est en général égal à l'unité; en cas de surcharge, ces machines donnent de l'avance de phase; en cas de faible charge du retard. — *Alimentation* (réseau positif) : En général, le fil à trolley est sectionné et chaque section est alimentée par un feeder; en prévision du cas où ce feeder serait hors service, la section non alimentée peut être provisoirement connectée aux sections voisines par des interrupteurs à couteaux qui sont ouverts en service normal; cette disposition semble supérieure à toutes les autres. Les feeders sont placés dans des conduits en poterie. Les lignes aériennes sont munies de parafoudres. La construction des lignes à trolley est délicate : d'après l'auteur, on se préoccupe trop de la conductibilité du fil et pas assez de sa résistance mécanique. L'auteur donne un bref aperçu des méthodes à employer pour calculer les feeders, pour déterminer les points d'alimentation et l'emplacement des sous-stations. — *Système de retour* (réseau négatif) : Le rail étant insuffisant pour assurer le retour du courant à l'usine, il a fallu faire appel à des feeders de retour convenablement branchés et même à un véritable réseau négatif isolé et soigneusement établi; les sous-voltteurs sur les feeders de retour n'ont pas eu grand succès en Amérique parce qu'ils compliquent les sous-stations.

V. *Distribution de courant continu pour chemins de fer aériens ou souterrains*, par E. J. BLAIR. — Il s'agit ici uniquement du trafic des voyageurs. Il semble qu'il n'y ait pas lieu de dépasser la tension de 600 V; la disposition des deux ponts de 600 V employée sur le City and South London Ry et surtout celle du Chemin de fer Nord-Sud de Paris semblent avantageuses à la fois pour éviter les courants vagabonds et diminuer le prix des feeders de retour. L'auteur discute ensuite un certain nombre de modes d'alimentation et attire l'attention sur l'importance du réseau de retour (réseau négatif) dans les chemins de fer souterrains.

VI. *Distributions de courant continu pour les chemins de fer interurbains*, par W. G. CARLTON. — Le courant à 600 V a été presque uniquement employé jusqu'à ces derniers temps; il était amené par troisième rail; l'emploi de batteries d'accumulateurs de réserve pour suppléer à une défaillance du service était rare; par contre, la capacité des sous-

stations était largement prévue. Aujourd'hui, on tend à adopter la tension de 1200 V; 28 compagnies américaines ont adopté des tensions comprises entre 1200 et 2400 V. Pour ces tensions, le trolley avec suspension caténaire est toujours employé, sauf par une compagnie qui adopte le troisième rail. La seule ligne à 2400 V déjà en fonctionnement emprunte son courant à des génératrices à courant continu mues par la vapeur. Chaque génératrice donne 1200 V, elles sont placées par deux en série. D'autres lignes utilisent des convertisseurs, commutatrices ou moteurs-générateurs donnant, soit directement, 1200 V, soit 600 V; on met alors deux machines en série. Les problèmes qui se posent à propos de la distribution du courant pour les lignes interurbaines ressemblent à ceux qui ont été examinés dans les appendices précédents.

VII. *Distribution de courant alternatif pour les chemins de fer interurbains*, par W. S. MURRAY. — L'emploi du courant alternatif ne sera intéressant que si l'on peut obtenir un bon rendement entre les bornes du circuit primaire et la barre d'attelage de la locomotive. Il y a lieu d'employer une seule fréquence, 25 périodes, pour ce genre de lignes.

VIII. *Relation entre l'appareillage et les problèmes de la distribution*, par E. B. MERRIAM. — L'auteur décrit sommairement l'appareillage destiné au service normal, à la protection du matériel (indicateurs de terre, relais, etc.). En courant continu, les interrupteurs, jusqu'à 1200 V, sont simplement munis de pare-étincelles en charbon; de 1200 à 5000 V, on se sert du soufflage magnétique. Pour le courant alternatif, l'interrupteur dans l'huile est d'un emploi universel. L'auteur recommande de shunter par une résistance les interrupteurs ou disjoncteurs automatiques pendant leur ouverture. La solution de beaucoup de problèmes de distribution d'électricité dépend uniquement de ce que peut réaliser l'appareillage.

IX. *Distribution de l'électricité pour l'éclairage public*, par Paul M. LINCOLN. — Comme ce service ne fonctionne que la nuit, il y a intérêt à installer un réseau spécial pour l'éclairage public permettant de couper d'un seul point le courant pendant les heures de jour. La distribution en série est souvent employée en Amérique pour l'éclairage public. Le courant varie de 4 à 10 A et le nombre de lampes en série est tel que la tension atteint jusqu'à 10 000 ou 12 000 V; les lampes sont des lampes à arc à longue flamme. On obtient un courant constant, soit par une génératrice à courant constant, soit par un transformateur recevant une tension constante au primaire et fournissant un courant constant au secondaire. Les génératrices à courant constant sont le plus souvent à courant continu et le seul type de machine pratiquement employé est celui qu'on nomme « machine Brush à arc », descendante directe de celle que fit Charles F. Brush entre 1875 et 1880. Le courant alternatif fourni par le transformateur à courant constant est souvent rectifié par un redresseur à mercure : ce système tend à remplacer la dynamo à courant constant. L'emploi du système série à courant constant permet l'allumage et l'extinction instantanés de tout le réseau; le prix du circuit de distribution est peu élevé, la lampe à arc à courant constant est stable et a, du fait que les résistances additionnelles sont supprimées, un meilleur rendement que la lampe branchée sur une distribution à potentiel constant; lorsque la lampe à arc est remplacée par une lampe à filament métallique, la distribution à courant constant permet l'emploi d'un filament gros et court; les lampes remplies d'azote, particulièrement avantageuses, sont destinées à recevoir de très nombreuses applications dans cette voie. Un autre système d'éclairage consiste à brancher un grand nombre de lampes en série entre les deux fils d'une distribution à courant alternatif à potentiel constant assez élevé (de l'ordre de 2000 V). Chaque lampe est shuntée par une bobine de réactance capable de supporter tout le courant et de maintenir ainsi la continuité du circuit dans le cas où la lampe se romprait.

État actuel des parafoudres à aluminium, par E. E. F. CREIGHTON
(*Amer. Inst. Elect. Eng.*, mai 1914).

Cette Communication, sans entrer dans la description des différentes formes d'appareils, donne un aperçu des parafoudres à aluminium, puis rappelle les recherches récentes sur le phénomène de la foudre et comment ces recherches pourront influencer sur les modifications à faire subir aux appareils actuels. S'il est prouvé dans l'avenir que tout coup de foudre produit une vague de haute fréquence dont le front est très abrupt, on peut prédire que beaucoup de parafoudres actuellement en usage devront disparaître et qu'il faudra chercher les bonnes solutions du côté des appareils absorbant les courants de haute fréquence; si, au contraire, le coup de foudre n'engendre qu'une vague de basse fréquence, presque tous les types de parafoudres actuels pourront continuer à être employés. Il semble que le coup de foudre engendre suivant les circonstances des ondes dont la fréquence varie de zéro à 5 millions de périodes et que le front d'onde est plus ou moins abrupt. Dans ces conditions, le parafoudre à aluminium pour courant continu est le plus économique et le plus sûr. A propos du parafoudre à aluminium pour courant alternatif, l'auteur discute les points suivants : retard de l'étincelle, dissolution de la pellicule, résistances à intercaler en série pendant le rechargement des parafoudres, oscillations, amortissement. Les accidents de ligne dus aux opérations mêmes de la charge des parafoudres à aluminium semblent dus à des défauts des appareils ou à des pratiques vicieuses lors de la charge; ce genre de mécompte est d'ailleurs à peu près inconnu en Amérique, tandis qu'il est fréquent dans d'autres pays. Les résistances de charge mises sur les parafoudres à aluminium doivent être choisies de façon à rendre les surtensions inoffensives; en outre, elles protègent parfaitement le parafoudre lui-même si son fonctionnement se trouve dérangé par quelque circonstance accidentelle. Le parafoudre à aluminium est aujourd'hui un appareil courant qu'on peut regarder comme présentant toutes les garanties et dont le fonctionnement repose sur des principes très solides.

L'énergie électrique, par D. B. RUSHMORE et Eric A. Lof
(*Amer. Inst. Elect. Eng.*, mai 1914).

Les auteurs retracent brièvement le développement de l'électricité jusqu'au temps présent et notent ses applications variées qui sont maintenant devenues des branches tout à fait spéciales de l'industrie électrique. La tendance actuelle est de faire assurer les services publics par des compagnies à monopole viables et dont la situation financière ne soit pas précaire : les avantages qui résultent de ce système sont discutés, ainsi que l'opportunité de combiner plusieurs sources d'énergie hydraulique avec des usines à vapeur de réserve et de grouper plusieurs réseaux sous le contrôle d'une compagnie unique. Les statistiques officielles récentes concernant les Etats-Unis sont utilisées par les auteurs pour exposer le développement de l'industrie électrique dans ce pays. La pratique actuelle va vers les unités génératrices de très grande puissance, vers les tensions élevées et vers les longues lignes de transmission. Cette Communication se termine par un bref aperçu des différentes applications nouvelles de l'électricité, en particulier de celle qui consiste à fixer directement l'azote de l'atmosphère, industrie qui emploie en Norvège une puissance de 300 000 chevaux.

BIBLIOGRAPHIE.

Conférences de Radiumbiologie, faites à l'Université de Gand en 1913..., sous les auspices de MM. Jacques DANNE et J. DE NOBELE. Bruxelles, L. Severyns, 1914; 1 vol. in-8.

Comme son titre l'indique, cet Ouvrage est un recueil de quatre conférences faites à l'Université de Gand sous les auspices de MM. Jacques Danne et de Nobele, à l'occasion de l'exposition de Gand. Ces conférences ont pour objet l'application des substances radioactives en biologie et en thérapeutique. Les questions physiques se rattachant aux corps radioactifs et à leur utilisation sont traitées dans deux conférences; l'une, de M. Jacques Danne, est relative à l'émanation considérée quant à ses propriétés, sa production et ses applications médicales; la deuxième, de M. Gaston Danne, traite de l'instrumentation en Radiumthérapie. MM. les D^{rs} Giraud et Coutard ont tiré des connaissances théoriques des déductions pratiques et se sont attachés aux ressources offertes à la médecine par les méthodes nouvelles basées sur l'emploi des corps radioactifs. De nombreuses figures illustrent le texte de ces conférences et contribuent à faire ressortir davantage encore l'intérêt de l'emploi en médecine du radium et de ses semblables. Une introduction à l'Ouvrage est consacrée aux propriétés générales des corps radioactifs et au laboratoire d'essai créé à Gif par M. Jacques Danne. Enfin le recueil se termine par une bibliographie très complète de la Radiumbiologie.

Cours de Physique, professé à la Faculté des Sciences de Nancy, par E. ROTHÉ;
1^{re} Partie. Paris, Gauthier-Villars et C^{ie}, 1914; 1 vol.

La première Partie de cet Ouvrage contient des généralités enseignées, par M. E. Rothé, à la Faculté des Sciences de Nancy, comme introduction aux cours proprement dits; elle est destinée à des lecteurs ayant déjà étudié la Physique, mais qui pourtant désirent préciser leurs connaissances générales et relier entre eux les faits, avant d'aborder les études supérieures de licence ou des Instituts techniques.

La question de la *Similitude en Physique* avait été trop souvent négligée dans l'enseignement, dit l'auteur; depuis l'éclosion et les progrès de l'aviation, la méthode des « modèles réduits » a été remise en honneur, si bien que de nos jours il devient essentiel que les jeunes étudiants s'habituent à raisonner sur la similitude, tout en apportant à leurs conclusions les corrections nécessaires, les restrictions dictées par l'expérience.

D'autre part, l'évolution de l'industrie conduit l'ingénieur à utiliser des méthodes de mesures de plus en plus précises et tout étudiant en sciences a intérêt à connaître, au moins dans les grandes lignes, les méthodes de laboratoire qui lui seront utiles, même s'il passe plus tard à l'atelier.

La seconde Partie est relative à la statique des fluides et à ses applications; elle contient des questions élémentaires, mais qui donnent lieu à des manipulations nombreuses, excellentes pour exercer les débutants aux méthodes de mesure et à la discussion de leur précision.

Une place à part a été réservée aux mesures fondamentales de la pression des gaz, de la vitesse des courants d'air et de leur débit pour ceux des élèves qui voudraient se livrer à des recherches aérologiques.

Dictionnaire juridique de l'industrie électrique, par E. CARPENTIER.
Paris, H. Dunod et E. Pinat, 1914; 1 vol.

Ce Recueil s'adresse plus particulièrement aux électriciens, qu'il s'agisse d'installation d'exploitation ou simplement de consommation d'électricité. « Il n'a d'autre prétention, dit l'auteur, que d'offrir, en quelque sorte, la cristallisation des dispositions législatives ou réglementaires, comme des décisions judiciaires les plus intéressantes, dans le but de permettre à l'industriel, mis en présence d'une difficulté juridique, d'apprécier rapidement si les unes ou les autres sont susceptibles de lui en fournir la solution. »

S'il a cru devoir adopter la forme d'un dictionnaire, c'est que la présentation alphabétique favorise, en effet, la rapidité des recherches. D'autre part, il a proscrit tout commentaire pour ne pas alourdir son travail soit d'une paraphrase inutile des textes, soit de dissertation d'un intérêt très relatif.

Chaque mot du *Dictionnaire* est suivi de renvois aux articles se rapportant au sujet principal et de l'indication abrégée des textes de lois, décrets et règlements qui constituent la deuxième Partie de l'Ouvrage dont la consultation se trouve être, ainsi, grandement simplifiée et facilitée.

Cours d'Électricité industrielle : Le courant continu; l'éclairage électrique,
par F. MAGONNETTE. Paris, H. Dunod et E. Pinat, 1914; 1 vol.

L'auteur a reproduit dans ce Volume, en recherchant le côté pratique des choses, la première partie des cours qu'il a professés à Charleroi, où il est chef du service de la fabrication aux Ateliers de constructions électriques; il le destine aux élèves des écoles industrielles et s'est efforcé, pour cette raison, d'être simple, bref et aussi complet que possible, en évitant d'y introduire tout calcul compliqué. L'Ouvrage est donc, en même temps, à la portée des personnes qui désirent acquérir des notions concrètes sur l'industrie électrique.

La partie principale du Livre, illustré de nombreuses gravures et planches hors textes s'applique au courant continu; elle comprend 26 Chapitres dans lesquels, entre autres sujets, sont étudiés : la réaction magnétique de l'armature et la tendance aux étincelles, l'inducteur, les propriétés des machines dynamos selon le genre d'excitation, les bobinages d'armature et les avantages des machines multipolaires, les électromoteurs et les systèmes de distribution à courant continu, etc.

La seconde Partie se rapporte à l'éclairage électrique et un Appendice reproduit les prescriptions normales pour la réception des machines et transformateurs électriques de la Chambre syndicale des Électriciens belges.



BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ INTERNATIONALE
DES
ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Compte rendu de la réunion mensuelle du 4 février 1915 : Membres décédés, p. 33. — Contribution à l'étude des piles électriques (M. H. Bellini), p. 35. — Sur les courants dans les arbres de dynamos (M. P. Girault), p. 45.

RÉSUMÉS DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES, p. 62.

BIBLIOGRAPHIE, p. 64.

IL Y A 30 ANS, p. 64.

COMPTE RENDU
DE LA
RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE
du jeudi 4 février 1915 (1).

PRÉSIDENCE DE M. BRYLINSKI.

La séance est ouverte à 17 h 5 m.

Le procès-verbal de la dernière réunion mensuelle est adopté.

M. le PRÉSIDENT fait part des décès survenus ou notifiés dans le courant du mois écoulé : MM. *Rey* (A.-S.) et *Bureau* (Joseph), tués à l'ennemi, M. *Michel* (Claude), mort à Hébuterne (Pas-

(1) La Société n'est pas solidaire des questions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

de-Calais) des suites de blessures reçues en combattant, et de M. *Desnuelles* (M.); il en exprime de profonds regrets et adresse aux familles de ces Sociétaires les condoléances émues de la Société.

En outre, ont été faits prisonniers : MM. Cornier (E.), interné à Munster, et Masson (E.) qui, blessé de trois éclats d'obus et relevé par des infirmiers allemands, est interné en Hanovre.

M. le PRÉSIDENT informe la réunion qu'il a reçu de la « United Engineering Society » une invitation à assister à l'inauguration de « the Engineering Foundation », laquelle a eu lieu à New-York le 27 janvier dernier; il n'a pas été permis de donner suite à cette offre qui n'est parvenue que trop tardivement.

L'ordre du jour appelle les Communications techniques.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES PILES ÉLECTRIQUES.

M. BELLINI. — « Une des causes d'affaiblissement des piles électriques, cause à laquelle on n'a pas prêté beaucoup d'attention, consiste dans l'électrolyse potentielle ou actuelle du sel formé par la combinaison du liquide excitateur avec le métal constituant l'électrode soluble.

» Considérons, par exemple, un élément de Volta. Au début de son fonctionnement, le liquide excitateur est une solution d'acide sulfurique : le radical acide de celui-ci se combine avec le zinc, et l'hydrogène se développe sur la lame de cuivre. Vers la fin du fonctionnement de la pile, le liquide n'est presque plus qu'une solution de sulfate de zinc, et le courant qui traverse l'élément, s'il est assez intense, doit fatalement décomposer le sulfate de zinc et déposer du zinc sur le cuivre. Les deux électrodes tendent à devenir identiques, et la pile devient de moins en moins apte à fournir du courant. La pile est polarisée par le zinc.

» Que ce phénomène puisse se produire, même dans un seul élément de pile, est montré par l'expérience directe. Il suffit pour cela de construire un élément de Volta avec des substances chimiquement pures et de le fermer en court circuit. Quand l'élément est épuisé, on constate que la lame de cuivre est recouverte de zinc; l'épaisseur de ce dépôt est très faible, vraisemblablement de l'ordre de l'épaisseur moléculaire du zinc.

» Mais, d'autre part, il est évident que la molécule de zinc déposée sur le cuivre forme avec celui-ci un couple galvanique qui tend à dissoudre à nouveau le zinc et à faire reprendre à la lame de cuivre son état primitif.

» Il est donc clair que, dans une pile de Volta, existent deux actions contraires : l'action électrolytique qui tend à déposer du zinc sur le cuivre, et l'action galvanique locale qui tend à dissoudre ce dépôt.

» Deux cas peuvent se présenter : ou la résistance extérieure est assez élevée; le courant pourra être si faible que le zinc ne se déposera pas ou sera dissous au fur et à mesure qu'il se déposera;

le courant sera constant; — ou la résistance extérieure est assez basse, et alors il se déposera sur le cuivre une quantité de zinc suffisante pour que le courant soit réduit à une telle valeur qu'il y ait équilibre entre la quantité de zinc qui se dépose sur le cuivre et celle qui s'en dissout. Nous savons tous, en effet, que, même une pile de Volta, fermée sur une résistance extérieure assez élevée, fournit un courant constant.

» Le phénomène de déposition de zinc sur le cuivre dans la pile de Volta a été plus ou moins clairement remarqué et expliqué par les physiciens.

» MM. Boutan et d'Almeida en parlent dans leur *Cours de Physique* ⁽¹⁾ dans les termes suivants :

« Lorsque l'acide a dissous une certaine quantité de zinc, la » décomposition qui s'opère dans chaque vase ne porte plus seule- » ment sur l'eau acidulée, elle porte sur le sulfate de zinc formé, » et le zinc entraîné par le courant vient se déposer sur la lame » de cuivre. De là une altération très grave : le liquide est de chaque » côté en présence de deux lames de zinc qu'il peut attaquer. » Deux forces électromotrices agissent en sens inverse et se détrui- » sent. La pile ne marche plus. »

» M. Napier, dans son *Manual of electro-metallurgy* ⁽²⁾, admet aussi que le zinc se dépose sur le cuivre, mais il donne une explication incorrecte du phénomène. Comme le dépôt de zinc commence toujours à la partie inférieure du cuivre, évidemment parce que la solution est plus concentrée au fond du vase, M. Napier croit que ce dépôt est dû à l'action de la lame de cuivre qui, en différents points de sa hauteur, se trouve en contact avec des solutions de densités différentes. Pour se convaincre que cela n'est pas possible, il suffit de faire l'expérience directe : on jette quelques cristaux de sulfate de zinc au fond d'un vase contenant une solution d'acide sulfurique et une lame de cuivre verticale. Le cuivre reste net et ne se recouvre nullement de zinc.

» Il est donc naturel que, pour obtenir une pile constante, il faille éviter le dépôt de zinc sur le cuivre.

⁽¹⁾ BOUTAN et D'ALMEIDA, *Cours élémentaire de Physique*, 5^e édition, 1884, p. 59.

⁽²⁾ Pages 38 et 39. Londres, 1876.

» Dans les piles à deux liquides (Daniell, Bunsen, etc.), ce dépôt est évité parce que le sel de zinc reste concentré autour de l'électrode zinc et ne peut pas, par conséquent, être décomposé.

» J'ai tenté d'obtenir le même résultat avec une pile à un seul liquide qui aurait présenté sur les piles à deux liquides l'avantage d'avoir une résistance intérieure assez basse, les électrodes pouvant être disposées très près l'une de l'autre et enchevêtrées comme dans les accumulateurs.

» Dans ce cas, le seul moyen d'empêcher l'électrolyse du sel produit par la réaction chimique, était évidemment celui d'employer des substances telles que ce sel fut insoluble. Le plomb se présentait donc immédiatement à l'idée, étant donné son bas prix et la grande quantité de sels insolubles qu'il forme.

» Les premiers essais révélèrent immédiatement un grave défaut : le sel de plomb, sulfate ou chlorure, formé par la réaction chimique, adhère fortement à la surface du plomb et fait augmenter la résistance intérieure de la pile au delà de toute limite admissible.

» Une légère amélioration fut obtenue en ajoutant de l'acide azotique aux acides nommés ci-dessus. Mais la solution du problème ne fut obtenue qu'en employant en outre l'amalgame de plomb à la place du plomb seul. De cette façon, le sel insoluble qui se forme se détache et tombe automatiquement au fond du vase.

» Les proportions des acides dans la solution peuvent varier entre certaines limites, suivant le but à atteindre. L'acide sulfurique est à préférer à l'acide chlorhydrique pour des raisons évidentes. Une bonne formule est la suivante :

Eau.....	1000	cm ³
Acide sulfurique ordinaire à 66° B.....	80	
Acide azotique ordinaire à 36° B.....	120	

» Si l'on augmente la proportion d'acide sulfurique, la force électromotrice de la pile augmente, mais sa résistance intérieure aussi, et quelquefois la pile a de la difficulté à démarrer. Si l'on augmente la proportion d'acide azotique, la force électromotrice diminue en même temps que sa résistance intérieure. Mais si la

quantité d'acide azotique est excessive, la pile se polarise à cause du dépôt de zinc.

» L'amalgame de plomb le plus convenable est constitué de 9 parties de plomb et de 1 partie de mercure.

» Il faut observer certaines précautions dans la formation de cet amalgame pour éviter la volatilisation du mercure. Il faut d'abord fondre le plomb; on le retire du feu, on y ajoute le mercure, on agite le tout et l'on verse dans les moules.

» L'électrode conductrice de cette pile peut être formée par un corps quelconque inattaquable par les acides employés. Le plus favorable est, évidemment, le charbon.

» La force électromotrice de la pile, formée par le liquide et l'amalgame cités tout à l'heure et par du charbon, est de 1,10 à 1,15 volt.

» La résistance intérieure de la pile varie, comme dans toutes

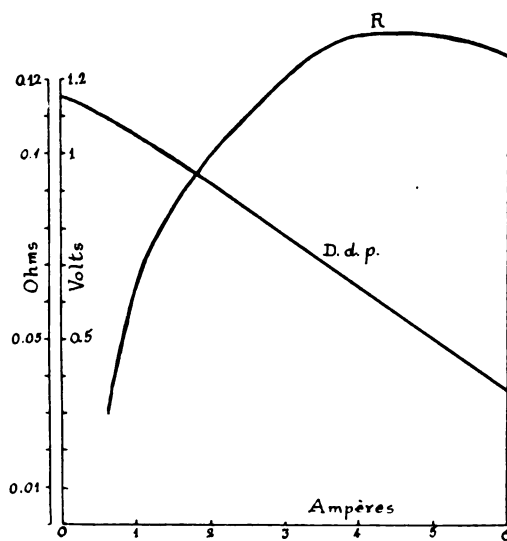


Fig. 1.

les piles, avec l'intensité du courant fourni. Dans la pile que nous considérons, l'augmentation de résistance dépend surtout de l'épaisseur de la couche de sulfate de plomb qui reste adhérente à la plaque d'amalgame de plomb avant de tomber au fond du vase.

La figure 1 montre, pour une pile de petites dimensions, la variation de la résistance intérieure et de la différence de potentiel aux bornes en fonction du courant fourni. La résistance tend vers une limite maximum d'environ 0,13 ohm. La plaque d'amalgame de plomb présentait 200 cm² de surface immergée et était disposée à une distance moyenne de 2 cm entre deux plaques de charbon de 230 cm² de surface totale.

» Pendant le fonctionnement, l'amalgame de plomb s'use en forme de coin avec tranchant en bas : et de lui tombe une pluie de poudre blanche et lourde qui se dépose au fond du vase. De l'électrode de charbon se développent des gaz nitreux. La quantité de ces gaz est assez faible pour rendre douteuse la nature de la réaction qui se produit à l'intérieur de la pile. Le dépôt est formé de sulfate de plomb, de mercure métallique et de traces de sulfates de mercure.

» Pour recueillir le gaz à analyser, on a procédé comme suit : on a donné à la plaque de charbon la forme d'un U à branches inégales. La branche la plus courte a été coiffée par une éprouvette, tandis que les parties d'où se seraient développés des gaz qui n'auraient pas pu être recueillis par l'éprouvette, étaient recouvertes d'un vernis isolant. Dans ces conditions, la pile, même en court circuit, fournissait trop peu de gaz : le remplissage de l'éprouvette aurait demandé des mois. Pour accélérer le remplissage de l'éprouvette, on a relié cette pile en série avec une autre. Dans ces conditions, la récolte de 100 cm³ de gaz a demandé environ 3 jours.

» Le résultat de l'analyse a été le suivant :

	Pour 100.
Azote.....	91,71
Vapeurs nitreuses et acide carbonique, ensemble....	2,90
Oxygène.....	5,39
Hydrogène.....	traces (?)
Carbure d'hydrogène.....	néant

» Quoique la pile ait été forcée, il est remarquable que la presque totalité du gaz soit constituée par de l'azote libre.

» La consommation d'amalgame de plomb à circuit ouvert est

très petite. Le Tableau suivant montre les résultats de deux observations faites dans des conditions différentes :

Numéros des essais.	Poids de la plaque		Consomma- tion (grammes).	Surface immergée (cm ²).	Composition des liquides.	cm ³
	au commen- cement.	après 24 heures.				
1.....	1157	1150	7	162	Eau.....	1000
					H ² SO ⁴ à 66°.....	75
					HNO ³ à 36°.....	100
2.....	712	711	1	260	Eau.....	1000
					H ² SO ⁴ à 66°.....	64
					HNO ³ à 36°.....	210

» La force électromotrice de la pile augmente légèrement pendant les premiers instants de sa fermeture, pour diminuer ensuite uniformément au fur et à mesure que le liquide s'épuise. La courbe de décharge ressemble à celle des accumulateurs.

» Les courbes de décharge que je vais montrer ont été relevées sur

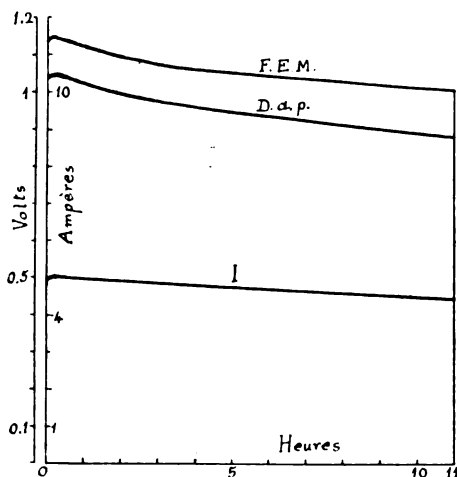


Fig. 2.

une pile formée de 4 plaques de charbon enchevêtrées avec 3 plaques d'amalgame de plomb. La surface totale d'électrode soluble en contact avec le liquide était de 900 cm²; celle du charbon de 1230 cm². La distance moyenne des électrodes était de 2 cm; la quantité

de liquide de 2600 cm³. La résistance intérieure avait la valeur de 0,022 ohm pour un courant de décharge de 5 ampères.

» La figure 2 montre les courbes de décharge sur une résistance extérieure fixe pendant 13 heures 30 minutes. La capacité obtenue a été de 58 A-h.

» Après 10 heures de repos, on a repris la décharge et l'on a

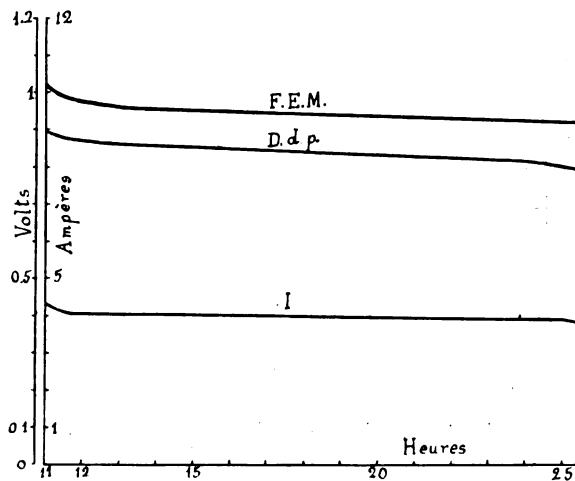


Fig. 3.

obtenu les courbes de la figure 3, qui correspondent à une capacité de 54,5 A-h.

» On a ajouté ensuite le liquide suivant :

Eau.....	450	cm ³
Acide sulfurique ordinaire à 66° B.....	96	
Acide azotique ordinaire à 36° B.....	192	

On a débarrassé la pile du dépôt au fond du vase et l'on a déchargé encore pendant 14 heures, obtenant les courbes de la figure 4 et une capacité de 63 A-h.

» Ensuite on a renforcé de nouveau le liquide en y versant la même solution que précédemment. Les courbes de la figure 5 montrent les résultats de cette décharge qui correspond à une capacité de 54 A-h.

» Après 13 heures 30 minutes de repos, la décharge a été reprise. La figure 6 en montre les courbes; la capacité obtenue a été de 61 A-h.

» On voit bien qu'il résulte de ces expériences que, en ajoutant du liquide neuf et en purgeant la pile du dépôt au fond du vase, on

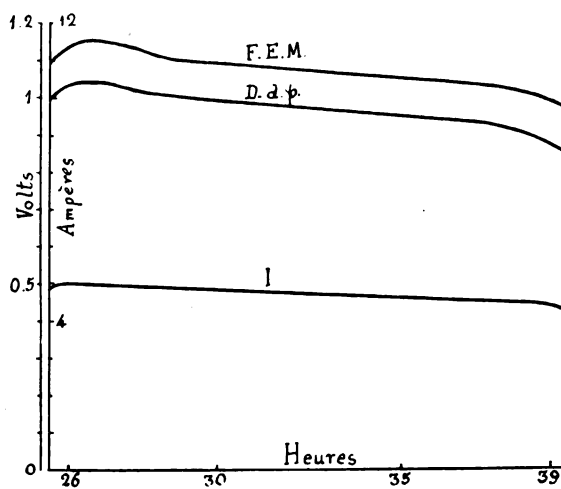


Fig. 4.

peut maintenir la pile en action aussi longtemps que dure la plaque d'amalgame de plomb.

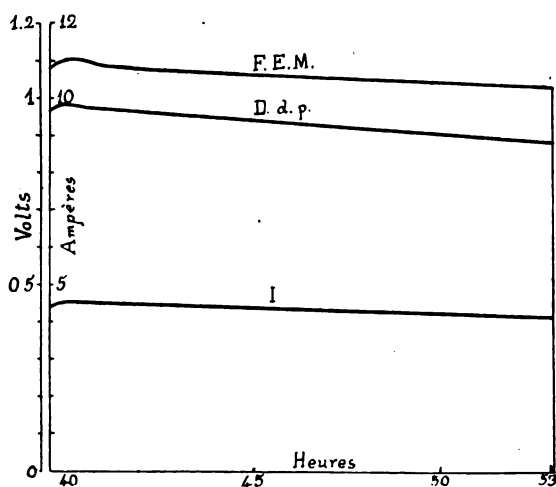


Fig. 5.

» La consommation d'amalgame de plomb a été d'environ 5 g par ampère-heure.

» Un inventeur doit se méfier de lui-même : il a une tendance

naturelle à trouver beau tout ce qu'il fait. Il est par conséquent prudent de faire contrôler son invention par un tiers.

» C'est ce que j'ai pu faire grâce à l'amabilité de la Société pour le travail électrique des métaux, à laquelle je me plais ici à témoigner toute ma reconnaissance.

» Ces essais ont été faits sur la même pile qui avait servi à mes essais.

» La force électromotrice a été trouvée de 1,25 volt. Cette diffé-

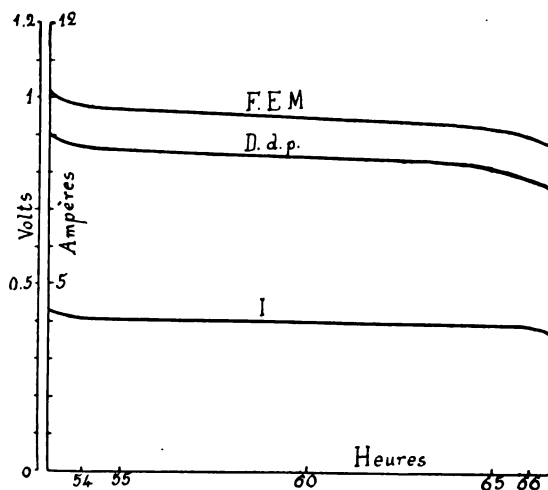


Fig. 6.

rence, avec la force électromotrice trouvée par moi-même, est due vraisemblablement à la densité de l'acide sulfurique que j'employais et que j'admettais, sans le vérifier, être celle que le vendeur me disait, c'est-à-dire de 66° B.

» Les essais de décharge à intensité constante de 5 ampères ont donné une capacité de 92,98 A-h jusqu'à une différence de potentiel de 0,5 volt. La différence de potentiel moyenne a été de 0,81 volt. La consommation de métal a été de 487 g de plomb et 42 g de mercure.

» Les essais de décharge à différence de potentiel constante de 0,898 volt ont donné un courant de 9 ampères au début et de 1,4 ampère à la fin de la décharge, laquelle a duré 20 heures. La capacité a été de 87,25 A-h.

» La consommation des matières a été la suivante :

Plomb.....	465 ^g
Mercurc.....	45
H ² SO ⁴	225,4
HAzO ³	114,4

» Ces résultats confirment donc ceux que j'avais obtenu.

» Au point de vue des applications, il me semble que cette pile présenterait des avantages sur d'autres générateurs dans des cas particuliers, par exemple pour les petits postes de télégraphie sans fil de campagne, pour de petites installations de galvanoplastie et pour des travaux de laboratoire. »

M. le PRÉSIDENT. — « Je remercie M. Bellini de sa très intéressante Communication. Nous sommes particulièrement heureux d'avoir entendu aujourd'hui un de nos amis d'Italie et je me permets de le féliciter de la perfection avec laquelle il manie notre langue. Les applaudissements qui ont accueilli la Communication de M. Bellini lui ont prouvé l'intérêt qu'il a su éveiller chez nos collègues. Il est grandement à souhaiter que les résultats d'expérience qu'il vient de nous communiquer et qui sont très remarquables, reçoivent la confirmation de la pratique journalière, car les emplois que peut trouver une bonne pile sont très nombreux. »

SUR LES COURANTS DANS LES ARBRES DE DYNAMOS.

M. PAUL GIRAULT. — « La production indésirée de courants dans les arbres et paliers de dynamos a été étudiée par plusieurs auteurs autrichiens : Punga et Hess, Fleischmann et Adler.

» Ces divers travaux envisagent uniquement la production de *courants alternatifs* dans les circuits électriques « arbre-palier-bâti ». Nous examinerons les points de base de ces travaux dans la seconde Partie de la présente étude.

» Dans la première Partie, nous nous occuperons de la production possible de *forces électromotrices continues* dans les arbres de dynamos.

PREMIÈRE PARTIE.

PRODUCTION DE FORCES ÉLECTROMOTRICES CONTINUES DANS UN ARBRE FONCTIONNANT EN DISQUE DE FARADAY.

» Considérons le circuit magnétique « arbre-palier-bâti » d'une dynamo; si l'arbre est entouré par un certain nombre d'ampères-tours at de courant continu, constituant une force magnéto-motrice $\mathcal{F}$,

$$\mathcal{F} = \frac{4\pi}{10} at,$$

il naît un flux φ dans le circuit magnétique considéré; si l'on n'envisage (*fig. 1*), pour simplifier, que les réluctances r_1 et r_2 des entrefers constitués par les coussinets, on a

$$(1) \quad \varphi = \frac{\mathcal{F}}{r_1 + r_2}.$$

» Mais l'arbre porte l'induit et celui-ci est entouré par la carcasse inductrice. L'ensemble des entrefers des différents pôles, réunis en parallèle entre eux et avec les espaces interpolaires, offrent radialement un passage au flux, passage de réluctance r_3 approximativement égale à $\frac{1}{2p}$ fois la réluctance de l'entrefer d'un

pôle. D'autre part, on peut avoir des forces magnétomotrices $\mathcal{F}_1$,

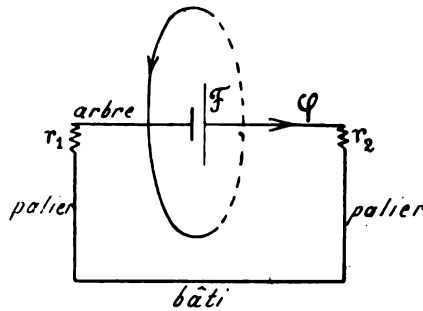


Fig. 1.

et $\mathcal{F}_2$ correspondant à des ampères-tours at_1 et at_2 entourant l'arbre de part et d'autre de la carcasse.

» Le schéma de la figure 2 s'applique alors ⁽¹⁾; en comptant

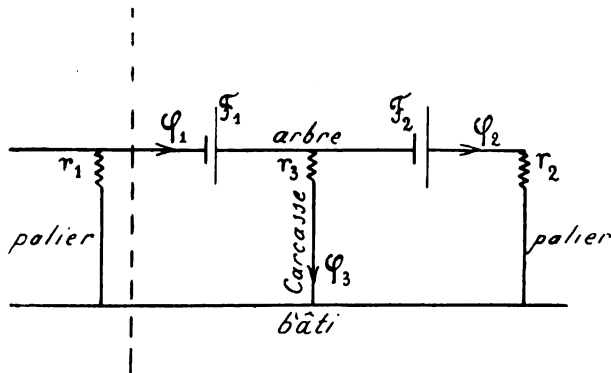


Fig. 2.

positivement les forces magnétomotrices et les flux dans le sens des flèches pour chaque portion de circuit magnétique, on a

$$(2) \quad \mathcal{F}_1 = r_1 \varphi_1 + r_3 \varphi_3,$$

$$(3) \quad \mathcal{F}_2 = r_2 \varphi_2 - r_3 \varphi_3,$$

et comme

$$(4) \quad \varphi_1 = \varphi_2 + \varphi_3,$$

$$(5) \quad \mathcal{F}_1 = r_1 \varphi_2 + (r_1 + r_3) \varphi_3;$$

⁽¹⁾ S'il y avait un second palier du côté de r_1 , ou tout autre organe doué de perméance, r_1 serait la réluctance réduite de toute la région située à gauche de la ligne pointillée (fig 2).

de (5) et (3) nous tirons

$$\tilde{\mathcal{F}}_1 r_2 = r_1 r_2 \varphi_2 + (r_1 + r_3) r_2 \varphi_3,$$

$$\tilde{\mathcal{F}}_2 r_1 = r_1 r_2 \varphi_2 - r_1 r_3 \varphi_3;$$

d'où

$$(6) \quad \varphi_3 = \frac{\tilde{\mathcal{F}}_1 r_2 - \tilde{\mathcal{F}}_2 r_1}{r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1}.$$

De même, (3) et (5) nous donnent encore

$$\tilde{\mathcal{F}}_2 (r_1 + r_3) = r_2 (r_1 + r_3) \varphi_2 - r_3 (r_1 + r_3) \varphi_3,$$

$$\tilde{\mathcal{F}}_1 r_3 = r_1 r_3 \varphi_2 + r_3 (r_1 + r_3) \varphi_3;$$

d'où

$$(7) \quad \varphi_2 = \frac{\tilde{\mathcal{F}}_1 r_3 + \tilde{\mathcal{F}}_2 (r_1 + r_3)}{r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1},$$

et en portant les valeurs (6) et (7) en (4), nous obtenons

$$(8) \quad \varphi_1 = \frac{\tilde{\mathcal{F}}_1 (r_2 + r_3) + \tilde{\mathcal{F}}_2 r_3}{r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1}.$$

» Les flux φ_1 et φ_2 cheminent dans l'arbre parallèlement à l'axe de celui-ci entre coussinets et carcasse; à la traversée par l'arbre

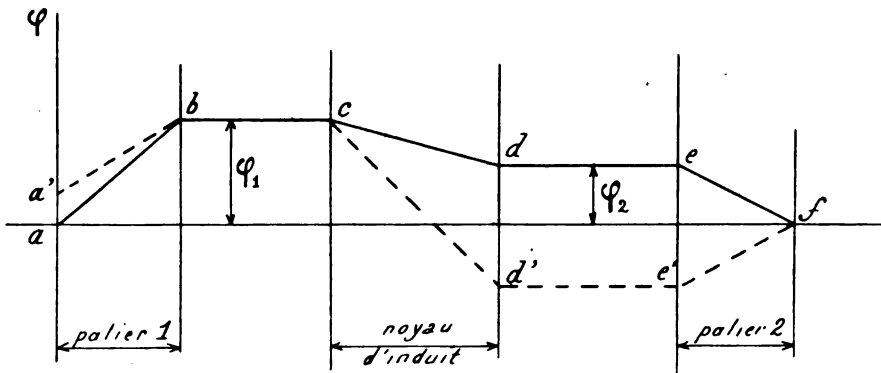


Fig. 3.

des coussinets, ces flux sortent de l'arbre pour entrer dans chaque palier suivant des trajectoires sensiblement radiales dont la distribution est à peu près uniforme dans toutes les directions. L'induction étant d'autre part sensiblement constante dans l'entrefer constitué par le coussinet, le flux φ traversant normalement la section de l'arbre varie d'une façon à peu près linéaire le long du coussinet.

» Par exemple, vers le palier 1, le flux φ varie suivant abc (fig. 3).

Il varie suivant def vers le palier 2, et suivant cd dans le noyau d'induit, mais dans cette dernière région, le flux φ se répartit de façon plus ou moins complexe entre l'arbre, le noyau d'induit et le croisillon,

$$cC = \varphi_1,$$

$$eE = \varphi_2.$$

» Il est à remarquer que si φ_2 était de sens contraire à φ_1 , la distribution de φ se ferait suivant une ligne telle que $ab cd' e' f$.

» Les flux φ traversant les sections droites de l'arbre ont une distribution sensiblement symétrique autour de l'axe dans toutes les directions; lorsque l'arbre tourne, chacune des sections se comporte à la façon d'un disque de Faraday et est le siège de forces électromotrices radiales, égales entre elles et ayant pour valeur

$$(9) \quad e = \frac{n}{60} \varphi,$$

n désignant le nombre de tours par minute ⁽¹⁾.

(1) *Disque de Faraday*. — Soit (fig. 4) un disque de Faraday avec un balai B frottant

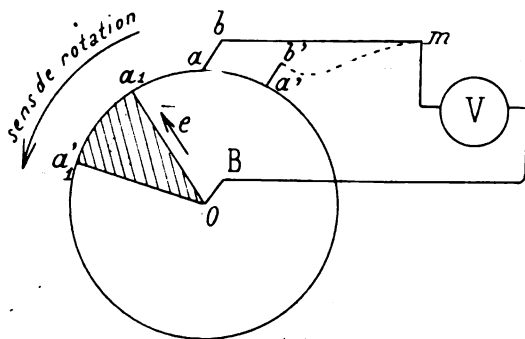


Fig. 4.

au centre O et un balai b frottant à la périphérie en a ; les balais B, b sont reliés à un circuit extérieur m contenant un électromètre ou un voltmètre V de très grande résistance. Le disque est traversé par un flux φ normal au plan du papier.

Considérons un circuit fermé déformable constitué à l'instant t par la branche extérieure OBmba, par la portion périphérique aa_1 et par un rayon quelconque du disque a_1O ; au temps $t + dt$ ce circuit s'est déformé, le rayon a_1O étant venu en a'_1O , et le circuit est devenu OBmba $a_1a'_1O$; le flux qu'il embrasse se trouve augmenté du flux $d\varphi$ contenu dans le secteur $a_1Oa'_1$; or

$$d\varphi = \frac{n}{60} \cdot \varphi \cdot dt;$$

» La f. e. m. e étant proportionnelle au flux φ sera représentée par la même courbe que lui (*fig. 3*) à un facteur constant près.

» Nous avons donc entre le centre de l'arbre et sa périphérie des f. e. m. variables suivant que l'on considère une section ou une autre de cet arbre, soit dans un même coussinet, soit dans des coussinets différents. Lorsque la couche isolante constituée par l'huile de graissage faiblira en deux points, nous pourrions donc avoir production de courants dus à la différence algébrique de ces f. e. m.; extérieurement à l'arbre, ces courants pourront aller d'un point à un autre point d'un même coussinet, ou aller d'un coussinet à un autre.

la force électromotrice induite dans le circuit considéré est donc, en valeur absolue,

$$e = \frac{dz}{dt} = \frac{n}{60} \varphi;$$

et sa direction, dans le cas de la figure 4, est donnée, d'après la loi de Lenz, par la flèche e .

Cette force électromotrice e est la même pour tous les rayons, puisque nous avons pris un rayon quelconque; et cette force électromotrice est localisée dans chaque rayon, puisqu'elle est indépendante de la forme de la branche extérieure du circuit.

Ce qui vient d'être dit est vrai que la bobine excitatrice soit fixe ou mobile avec l'arbre, et qu'elle ait ou non même vitesse angulaire que celui-ci. Dans tous les cas, *l'unique cause de force électromotrice est la déformation du circuit où doit être engendrée cette force électromotrice*, accompagnée de la variation correspondante du flux embrassé par ce circuit.

Ceci s'applique au cas d'un alternateur homopolaire qui nous a été indiqué par M. Guilbert; cet alternateur était le siège de fuites magnétiques intenses en bout d'arbre, ce qui se comprend aisément puisque la force magnétomotrice élevée de la bobine inductrice s'appliquait entièrement au circuit « arbre-palier bâti », et l'on aurait pu trouver des différences de potentiel continues entre le centre et la périphérie de l'arbre.

Si la bobine excitatrice est seule mobile, il est bien évident que le voltmètre V n'indiquera rien puisqu'il n'y a plus ni déformation de circuit ni, par suite, variation de flux. Nous n'avons pas à voir s'il y a *renouvellement* des lignes de force; il y a ici quelque chose d'analogue à l'absence de courants de Foucault dans un élément d'induit passant sous une masse polaire, ces courants ne se produisant que lorsque l'élément aborde ou quitte la masse, quand la valeur du flux traversant cet élément varie.

Il n'y a également aucune force électromotrice induite si, *laissant l'arbre fixe, on fait tourner le balai b* , en sens inverse par exemple du sens de rotation primitif; en effet, si ce balai et le conducteur bm arrivent en $a'b'm$ au bout d'un temps dt , le circuit déformable $OBmba_1O$ est devenu $OBmb'a_1O$, mais il n'a été le siège d'aucune variation de flux du fait de l'arbre; il ne pourrait y avoir force électromotrice induite que du fait d'une variation de flux due à la déformation extérieure et donnée par le flux traversant le circuit $abmb'a'a$.

» Mais tant que l'arbre ne débitera pas ainsi extérieurement, il ne pourra y avoir aucune circulation de courant dans cet arbre, bien que l'on constate des différences de potentiel entre différents points de sa périphérie.

» On en comprendra la raison de façon explicite dans un cas particulier.

» Soient (fig. 5) deux sections circulaires normales de l'arbre,

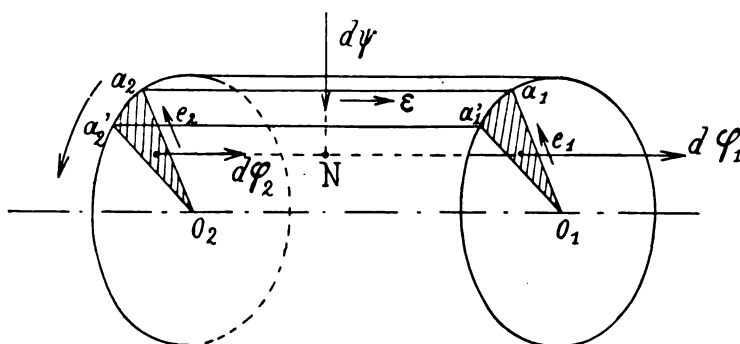


Fig. 5.

de centres O_1 et O_2 . L'arbre tournant dans le sens indiqué, les rayons correspondants O_1a_1 et O_2a_2 des deux sections balaient respectivement en un temps dt les secteurs $O_1a_1a'_1$ et $O_2a_2a'_2$, auxquels correspondent les variations de flux $d\varphi_1$ et $d\varphi_2$ et les f. e. m. e_1 et e_2 ; ces f. e. m. sont proportionnelles à $d\varphi_1$ et $d\varphi_2$ et sont ici dirigées toutes deux du centre vers la périphérie.

» Mais si nous considérons la génératrice a_1a_2 , correspondant aux rayons O_1a_1 , O_2a_2 , cette ligne balait durant le temps dt la surface $a_1a_2a'_1a'_2$ à laquelle correspond une variation de flux $d\psi$ et une f. e. m. ε entre a_1 et a_2 , ε étant proportionnelle à $d\psi$ avec un coefficient de proportionnalité égal à celui de e_1 et e_2 . Or, en appliquant la première loi de Kirchhoff en N, on a

$$d\psi + d\varphi_2 = d\varphi_1,$$

d'où

$$\varepsilon + e_2 = e_1;$$

le sens de ε est indiqué sur la figure.

» La somme des f. e. m. dans le circuit $O_1a_1a_2O_2O_1$ est donc bien nulle; et ceci serait vrai quel que soit le sens de φ_2 par rapport à φ_1 .

» On comprend d'ailleurs *a priori* que la somme des f. e. m. induites dans un circuit quelconque fermé à l'intérieur de l'arbre et lié à celui-ci est toujours nulle lorsque l'arbre ne débite pas extérieurement, puisque la distribution de flux à l'intérieur de ce circuit reste immuable pendant la rotation.

» Mais si l'on considère au contraire un circuit qui passe en partie par l'arbre et vient se fermer à l'extérieur en traversant le joint d'huile des coussinets en deux points tels que a_1 et a_2 , la f. e. m. active agissant dans ce circuit est la f. e. m. induite du fait de la rotation entre ces deux points a_1 et a_2 , quel que soit le chemin suivi à l'intérieur de l'arbre entre ces deux points; ceci résulte immédiatement de l'alinéa précédent.

» Lorsque l'arbre débite extérieurement, il est le siège de courants à peu près comme le serait un ensemble de plusieurs induits de f. e. m. égales à vide et de résistances différentes débitant en parallèle.

» *Origine des forces magnétomotrices agissantes.* — Les forces magnétomotrices agissantes, telle que $\mathcal{F}_1$ et $\mathcal{F}_2$, sont ordinairement dues à une disposition vicieuse de connexions à grosses intensités de courant, ces connexions servant par exemple à effectuer la liaison entre bobines inductrices compound, supplémentaires et de compensation; les connexions entre tourillons porte-balais ont également de l'importance, mais doivent être considérées conjointement avec l'enroulement même de l'induit. Il y a enfin lieu de tenir compte également des liaisons réunissant ces différents éléments de la machine entre eux et le circuit extérieur lui-même.

» Nous n'avons pas eu occasion de constater jusqu'ici de détériorations dues aux courants continus envisagés dans cette étude; nous croyons néanmoins qu'il est sage d'éviter la cause de production des forces magnétomotrices qui les engendrent et, pour cela, un examen judicieux des différentes parties des circuits à grande intensité nous semble désirable lors des études. On sera guidé dans cet examen par les règles suivantes :

» 1^o *Un circuit fermé (électrique ou magnétique) est toujours décomposable en un nombre entier exact de circuits ou spires strictement fermés.*

» Cette règle n'est en somme qu'une forme particulière du principe de la conservation de l'intensité de courant et du flux magnétique. Nous ne l'appliquerons ici qu'aux seuls circuits électriques; elle rejette immédiatement la considération erronée de *fractions de spires* (demi-spires ordinairement) dans les enroulements de machines.

» 2^o Cette décomposition se fera toujours aisément en ajoutant, là où il sera nécessaire, deux éléments de circuits superposés traversés par des courants égaux et de signes contraires.

» 3^o On estimera, au moins qualitativement, l'action des différents circuits strictement fermés en considérant que les branches du circuit magnétique comprises à l'intérieur d'un de ces circuits électriques débitent en parallèle sur les branches extérieures.

» Joignons à ces règles l'exposé du but poursuivi :

» 4^o Le but ici poursuivi est d'éviter qu'un circuit électrique fermé entoure entièrement l'arbre en traversant un nombre impair de fois le circuit magnétique « arbre-palier-bâti », supposé ramené à une spire simple.

» *Circuit électrique général.* — Le circuit magnétique « arbre-palier-bâti » est un peu plus compliqué que celui envisagé par nous dans la figure 1 : si mm' et nn' représentent deux paliers (fig. 6) le circuit magnétique se divise aux points m' , n' en deux dérivations $m'acn'$ et $m'bdn'$.

» Un circuit électrique tel que $A_1B_1C_1D_1$ (fig. 6), coupant le plan du bâti en A_1C_1 , est bien actif, au même sens que le cercle de la figure 1, car d'après la règle 3^o ci-dessus, l'arbre mn , intérieur à ce circuit, débitera son flux sur les deux branches extérieures en parallèle : $m'acn'$ et $m'bdn'$. La contradiction apparente avec l'exposé 4^o est supprimée si l'on suppose les deux moitiés du bâti ramenées vers le bas de la figure de façon que a coïncidant avec b et c avec d on se trouve ainsi ramené à un circuit magnétique en forme de spire ou de cadre simple.

» Un circuit électrique tel que $A_2B_2D_2$ (fig. 6), coupant le plan du bâti uniquement en A_2 , est également actif, mais on voit alors

que la branche palier-arbre $m'mnn'$ et le demi-bâti $m'bdn'$ tous deux intérieurs au circuit électrique, débitent magnétique-

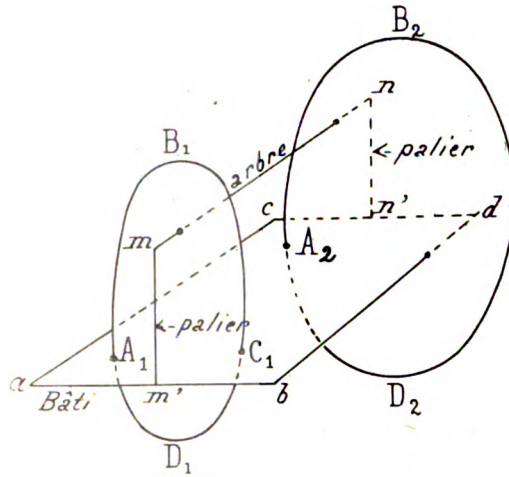


Fig. 6.

ment en parallèle sur l'autre demi-bâti $m'acd$, seul extérieur à ce circuit.

» Un circuit électrique tel que ABCD (fig. 7), dont les deux

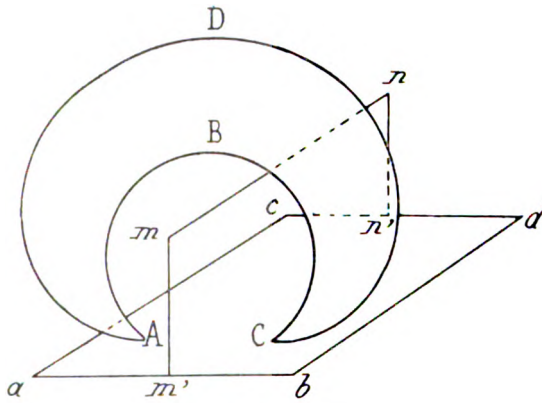


Fig. 7.

branches ABC et CDA passent au-dessus de l'arbre, n'est pas actif; il donnera néanmoins lieu à des flux de fuite, les trois branches $m'mnn'$, $m'acn'$ et $m'bdn'$ recevant en parallèle le débit magnétique de l'air compris à l'intérieur du circuit ABCDA. Les points A et C sont par exemple des bornes placées sur le bâti.

» Considérons enfin (fig. 8) un circuit tel que ABCDA qui, partant de B, traverse en A et C le plan du bâti et passe sous celui-ci pour venir se fermer en D au-dessus de l'arbre; ajoutons suivant ef et $e'f'$ deux éléments de circuits superposés traversés

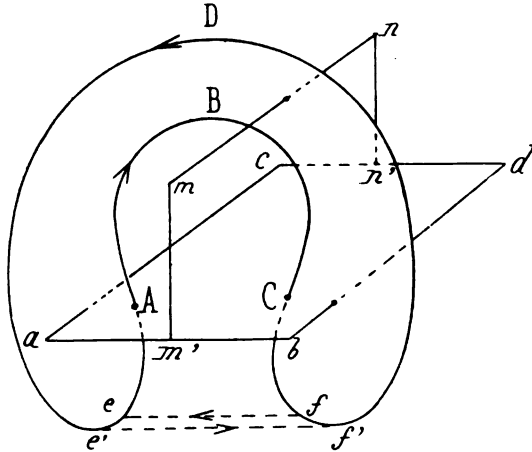


Fig. 8.

en sens inverse l'un de l'autre par un courant égal au courant dans le circuit ABCDA; nous remplaçons ainsi ce circuit par deux autres strictement fermés : le premier, ABCfeA, est actif à notre point de vue; le second, $e'Df'e'$, ne peut produire que des flux de fuite, les trois branches magnétiques $m'mnn'$, $m'bdn'$ et $m'acn'$, intérieures à ce circuit, débitant en parallèle sur l'air extérieur.

» *Bobines inductrices compound, supplémentaires et compensatrices.* — Nous examinerons simplement un cas particulier, à titre d'exemple, celui de quatre bobines inductrices compound montées en deux groupes en série de chacun deux bobines en parallèle.

» Dans la figure 9, nous avons réduit un bobinage inducteur compound tétrapolaire à sa plus simple représentation schématique; pour cela, nous avons omis autant qu'il a été possible celles des spires qui sont nettement fermées autour de chaque pôle. Le courant I arrive par la borne A et ressort par la borne B; des connexions Ac, bdg, fhB, toutes disposées *en avant* de la carcasse, effectuent les liaisons entre bobines; si le circuit extérieur entre

A et B est équivalent à une liaison directe entre A et B, l'ensemble des conducteurs de la figure 9 revient à un nombre entier de spires strictement fermées entourant l'un ou l'autre des pôles inducteurs et qui sont pour nous inactives, et à une spire active entourant l'arbre *en avant* de la carcasse, spire traversée par le courant I .

» En effet, partant de A, nous avons pour le tronçon Aa le plein courant I . En a, une partie i_1 du courant I se dirige vers b en passant derrière le pôle 1, puis ce courant i_1 passe de b en d par la connexion bd en avant de la carcasse; le reste $I - i_1$ du courant continue de a en c par la connexion ac, puis de c en d derrière le pôle 2. Joignons le point a au point le plus voisin de bd par deux

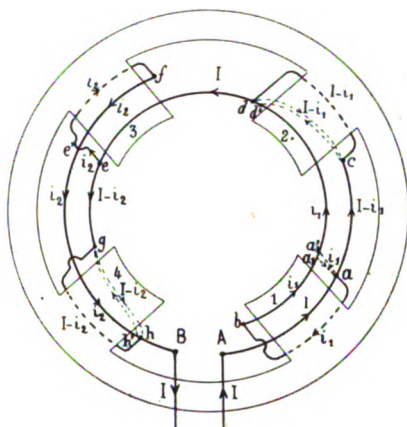


Fig. 9.

éléments de courant i_1 , superposés, égaux et de sens contraires, et soient aa_1 et aa'_1 ces deux éléments; nous obtenons ainsi une spire aa_1ba , traversée par le courant i_1 ; cette spire entourant le pôle 1 est inactive à notre point de vue. Il nous reste en avant de la carcasse le tronçon Aa traversé par le courant I . Puis ce tronçon se divise en a, d'une part suivant ac avec un courant $I - i_1$, d'autre part suivant aa'_1d avec un courant i_1 , et la somme de ces deux courants est encore I .

» Pour le pôle 2, joignons directement cd par deux éléments de courant superposés $I - i_1$ égaux et de sens contraire, cd et cd' ; nous obtenons une spire $cdcd'$ traversée par $I - i_1$, entourant le pôle 2 et inactive pour nous. Il nous reste en avant de la carcasse le tronçon cd' avec son courant $I - i_1$, lequel en parallèle avec le

courant i_1 de la connexion bd complète jusqu'en d la première partie de la spire active de courant I en avant de la carcasse; cette première partie est prolongée jusqu'en e par la connexion de .

» En e , le courant I se divise en un courant i_2 qui entoure le pôle 3 par une spire $e'fe'$ inactive pour nous, de telle sorte qu'il nous reste l'équivalent d'un conducteur $ee'h$ placé en avant de la carcasse et traversé par le courant i_2 . Le reste $I - i_2$ du courant continue avec le courant i_2 précédent, la spire active jusqu'en g , puis passe de g en h derrière le pôle 4. Joignons directement gh par deux éléments de courant superposés $I - i_2$ égaux et de sens contraire, gh et gh' ; la spire $gh'g$ traversée par $I - i_2$ et entourant le pôle 4 est inactive pour nous. Il nous reste en avant de la carcasse le tronçon gh , traversé par le courant $I - i_2$, lequel, ajouté au courant i_2 de la portion $e'h$ de la connexion fh , complète ainsi jusqu'en h , puis jusqu'en B et en A la spire active traversée par le courant I .

» Tout autre cas de bobinage inducteur compound, supplémentaire ou compensateur, se traiterait aisément de façon analogue.

» *Enroulements et connexions d'induit.* — A titre d'exemple, nous examinerons uniquement ici le cas très simple des induits

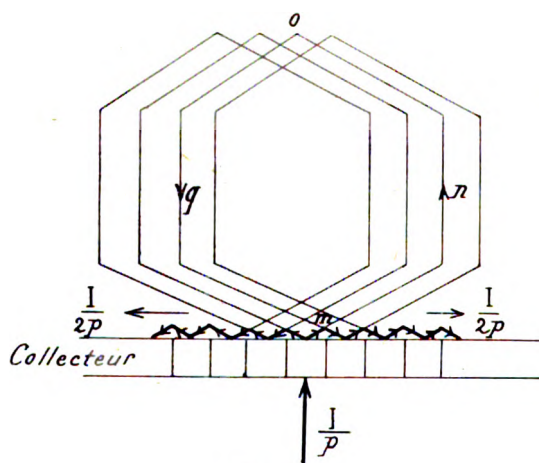


Fig. 10.

à collecteur bobinés en parallèle (enroulement imbriqué ou multiple); c'est le type de bobinage ordinairement employé dans les dynamos à courant continu à grande vitesse angulaire et forte

intensité qui sont particulièrement en cause ici. Nous supposons qu'il y a une seule spire par section.

» Le bobinage peut être effectué de deux façons, avec ou sans croisement des développantes côté collecteur d'une même section d'induit.

» S'il y a croisement des développantes (*fig. 10*), il est facile de vérifier que l'enroulement induit peut se décomposer en une série de spires strictement fermées n'entourant pas l'arbre, telles que $m n o q m$, et en $2p$ portions de conducteurs ayant la forme de lignes brisées voisines du collecteur; ces lignes brisées sont constituées par les tronçons de développantes non compris dans les spires strictement fermées inactives, ces tronçons réunissant les lames du collecteur au premier point de croisement des développantes à partir de cet organe.

» Chaque ligne brisée comprise entre deux tourillons porte-balais est traversée par un courant $\frac{I}{2p}$; le sens de ce courant change lorsqu'on passe d'une ligne brisée à la suivante, de telle sorte que

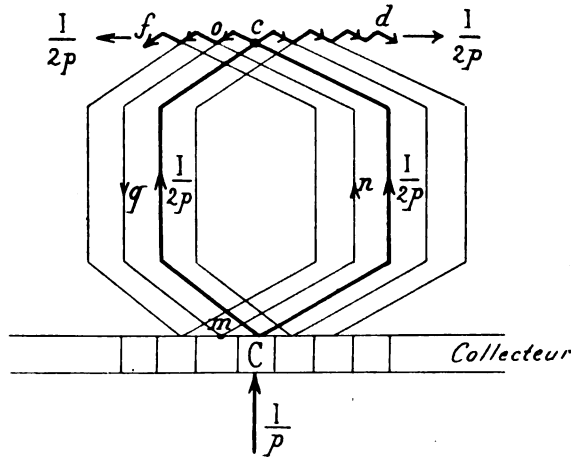


Fig. 11.

le courant arrivant au tourillon se divise en deux parties égales entre les deux lignes en zigzag qui y aboutissent.

» S'il n'y a pas croisement côté collecteur des développantes d'une même section (*fig. 11*), ce qui est le cas ordinaire, l'enroulement d'induit peut être décomposé d'une part en une série de spires

strictement fermées n'entourant pas l'arbre, telles que $m n o q m$, et d'autre part en $2p$ portions de conducteurs en zigzag telles que cd , cf , constituées par les tronçons de développantes non compris dans les spires précédentes. Dans ce second cas, les lignes en zigzag se trouvent du côté opposé au collecteur et sont alimentées en chacun de leurs points de réunion, tel que c , par les deux conducteurs d'induit partis de la lame C et venant se croiser en c .

» Bien que les lignes en zigzag éventuellement actives se trouvent à l'arrière de l'induit dans le second cas examiné, ce cas se confond évidemment avec le premier; en effet, si nous réunissons deux axes porte-balais consécutifs par deux éléments de courant $\frac{I}{2p}$ égaux et de sens inverse, l'un de ces éléments se combine avec deux conducteurs d'induit distants d'un pôle et tels que C c et avec la ligne cd côté développante correspondante, ce qui nous donne une spire strictement fermée inactive; et il nous reste l'autre élément $\frac{I}{2p}$, de même sens que la ligne cd ; tout se passe donc comme si la ligne en zigzag cd avait été déplacée parallèlement à elle-même et amenée contre le collecteur ou entre les tourillons porte-balais qui lui correspondent.

» Appliquons ces considérations à un induit multiple tétrapolaire pour deux modes différents des connexions entre tourillons porte-balais :

» Dans les figures 12 et 13, A B C D représentent les quatre tourillons auxquels correspondent en $abcd$ les points de liaison des tronçons en zigzag; O désigne l'axe de l'arbre. Nous supposons que les liaisons extérieures entre D et A équivalent à une liaison directe entre D et A au-dessous de l'arbre.

» Dans la figure 12, le tourillon A alimente C par une connexion passant au-dessus de l'arbre; le tourillon D alimente B par une connexion passant au-dessus de l'arbre. On trace facilement la répartition des courants en partant du point A; de ce point, une moitié $\frac{I}{2}$ du courant total I va retrouver C, l'autre moitié se répartissant également entre les tronçons en zigzag ab et ad . On obtient de proche en proche la répartition indiquée figure 12. On constate alors que tout rayon allant de O vers la périphérie rencontre une somme

de courants égale à $\frac{3I}{4}$ pour la région ABCD; on obtient au contraire $\frac{I}{4}$ pour la région AD. Tout se passe donc comme si l'arbre était entouré par une spire active strictement fermée traversée par un

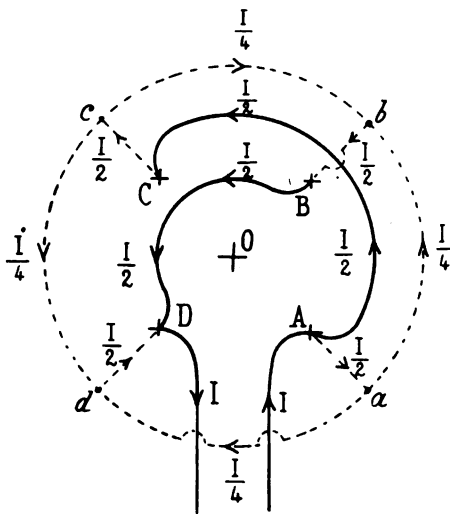


Fig. 12.

courant $\frac{3I}{4}$, et qu'il y ait au-dessous de l'arbre une autre spire inactive strictement fermée traversée par un courant $\frac{I}{4}$.

» Dans la figure 13, le tourillon A alimente le tourillon C par deux connexions symétriques par rapport à l'arbre; le tourillon D alimente B par une connexion passant au-dessous de l'arbre. La distribution des courants étant tracée de proche en proche en partant de A, par exemple, on constate qu'un rayon parti de O rencontre une somme de courants égale à zéro pour toute la région ABCD, et une somme égale à I pour la région DA. Tout se passe donc comme si aucune spire active n'entourait l'arbre; on a simplement une spire inactive, de courant I , strictement fermée au-dessous de l'arbre.

» *Résultats pratiques.* — Sur une génératrice à courant continu de 400 kilowatts (250 volts, 1600 ampères) à 1800 tours par minute, on obtenait, lors de la marche à vide, une différence de potentiel

de 0,325 volt entre le centre de l'arbre et la périphérie de l'une de ses sections droites; cette tension de 0,325 volt était indépendante de la valeur de l'excitation shunt et subsistait lorsqu'on supprimait cette excitation.

» Cette tension était due à un flux rémanent très important, car

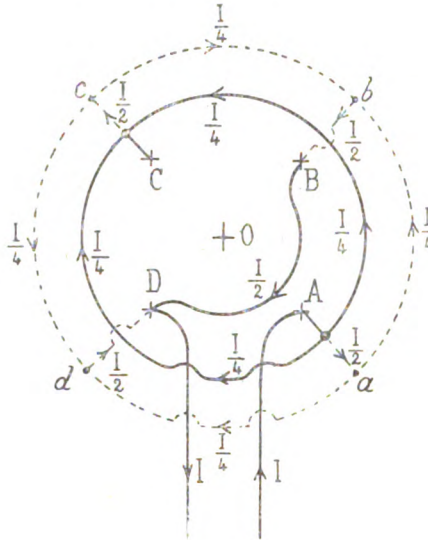


Fig. 13.

elle correspondait, d'après la formule (9), à une induction moyenne de 5400 gauss dans la section correspondante de l'arbre.

» En augmentant la charge de la machine, la tension d'arbre montait progressivement et atteignait 0,56 volt pour 700 ampères.

» La valeur élevée du flux rémanent doit tenir à la longueur importante du circuit magnétique fonte représenté par le bâti. La suppression de ce rémanent peut être chose assez difficile, car les forces magnétomotrices $\mathcal{F}_1$ et $\mathcal{F}_2$ peuvent résulter de l'action d'inducteurs compound, supplémentaires et compensateurs, et aussi d'enroulements d'induit, le tout agissant de façon complexe d'après le mode représenté figure 2.

» *Conclusion.* — Il nous semble utile, dans l'étude des machines à courant continu à grosse intensité, d'examiner avec attention l'action des connexions et des enroulements sur le circuit magnétique « arbre-palier-bâti ». Les considérations qui précèdent peuvent faciliter cet examen. L'alimentation en parallèle des

enroulements avec répartition symétrique des courants par rapport à l'arbre peut être souvent appliquée, mais demande une bonne exécution des contacts et une égale résistance des enroulements en parallèle.

» *Extension aux alternateurs.* — Ce qui vient d'être exposé s'applique également aux enroulements d'induit des alternateurs à forte intensité; si par suite d'un manque d'étude des connexions d'induit, on établit des forces magnétomotrices alternatives entourant l'arbre de façon active, il y aura production dans le circuit « arbre-palier-bâti » d'un flux alternatif et l'arbre fonctionnera en *roue de Faraday-alternateur*; cette action sera amortie par l'*effet d'écran* qui se développera dans l'arbre, dans la carcasse d'induit, etc., ces organes agissant en secondaires de transformateurs par rapport aux spires nuisibles actives considérées comme primaire.

» Cet effet d'écran explique la constatation d'étincelles entre les joints de boucliers d'induit fixe dans des alternateurs présentant cette défectuosité; on a pu voir rougir la pointe d'un clou appliquée dans l'un de ces joints alors qu'un voltmètre appliqué précédemment entre les deux bords du joint ne donnait pas d'indication appréciable. »

M. le PRÉSIDENT. — « Je remercie M. Girault de sa Communication. Les ingénieuses considérations qu'il vient de nous exposer sont extrêmement intéressantes et nous serons heureux d'en entendre la suite dans une prochaine séance. »

La séance est levée à 18 h 10 m. .

RÉSUMÉS DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES.

Les rotations ionomagnétiques, par A. RIGHI (*Elettrotecnica*, 25 janvier 1915).

Dans une conférence faite le 1^{er} novembre 1914 en son Institut de Physique, M. Righi a exposé aux Membres de l'Association électrotechnique ses dernières recherches et découvertes concernant certains phénomènes nouveaux.

Il commence par un résumé étendu de l'ensemble des connaissances actuelles sur les phénomènes électriques et en particulier sur la propagation de l'électricité, en mettant en relief le rôle des *ions* en mouvement et l'influence extraordinaire qu'ont eue, sur les conceptions fondamentales de la science, les découvertes modernes et surtout celle de l'*électron*. Il complète cet exposé préliminaire par un rapide compte rendu de ses recherches sur les rayons qu'il a appelés *magnétiques*.

Ces expériences ont conduit M. Righi à découvrir les phénomènes qui sont l'objet principal de sa conférence. Il a pu en effet s'apercevoir de ce fait qu'un corps, très mobile autour d'un axe placé dans un gaz convenablement raréfié et ionisé (par exemple en faisant éclater des étincelles de décharge), prend un mouvement de rotation dès qu'on crée un champ magnétique dirigé suivant l'axe.

Ce sont là les *rotations ionomagnétiques*.

L'explication qu'il donne de ces phénomènes est basée sur le fait bien connu, que la trajectoire d'une particule électrisée (ion ou électron) change, lorsqu'on fait agir le champ magnétique, et qui, si celui-ci est uniforme, devient une hélice à axe parallèle au champ. Le sens dans lequel cette courbe est parcourue coïncide avec le sens du courant circulant dans la bobine qui produit le champ, lorsqu'il s'agit des ions négatifs ou des électrons; le sens est opposé s'il s'agit des ions positifs. Ainsi, pendant que les ions et les électrons parcourent d'ordinaire, entre un choc et l'autre, des trajectoires sensiblement rectilignes, ils parcourent des arcs d'hélice si le champ magnétique existe.

Cela posé, on a pu démontrer par certains calculs, ou simplement par des considérations géométriques, que les chocs produits sur la surface du corps mobile par les ions d'un certain signe, par exemple positif, s'inclinent sous l'action du champ magnétique dans un certain sens tout autour de ce corps, d'où la rotation. Celle-ci a lieu dans le sens même du courant producteur du champ dans le cas des ions positifs; les ions négatifs et les électrons tendent à produire une rotation de sens contraire.

De même que la *quantité de mouvement* communiquée dans l'unité de temps, soit à l'une des parois d'un récipient contenant un gaz, soit à une portion quelconque de la surface d'un corps immergé, par les chocs des molécules du gaz, équivaut à une *force continue*, qui est la pression exercée par le gaz, le *moment*, par rapport à un axe parallèle au champ, de la *quantité de mouvement* communiquée, soit aux parois, soit au corps mobile, équivaut à un *couple continu*. Ce couple donne lieu à la rotation ionomagnétique, soit du récipient, s'il peut tourner, soit du corps mobile.

Comme ce couple change de signe en changeant le signe des particules électrisées, les rotations ionomagnétiques sont produites généralement par la différence de deux couples de sens contraires.

Arrivé à ce point, M. Righi met en action divers appareils montrant les rotations ionomagnétiques; puis il en décrit d'autres dans lesquels le corps mobile est électrisé et fonctionne comme électrode au passage d'un courant à travers le gaz.

Ce courant, ionisant le gaz, dispense de recourir à d'autres moyens d'ionisation; mais ce qui caractérise surtout les nouvelles expériences c'est que, le corps étant chargé, ce sont presque exclusivement les chocs des particules de signe contraire à celui de sa charge qui le mettent en mouvement, d'où la production de mouvements plus rapides.

Une dernière classe d'expériences de rotation ionomagnétique, que l'orateur décrit et exécute, diffère des expériences précédentes en ce que les électrodes, par lesquelles un courant pénètre dans le gaz, sont fixes, pendant qu'un corps pouvant tourner autour d'un axe parallèle au champ magnétique est placé entre les électrodes, qui ont d'ordinaire dans ce cas la forme de cylindres coaxiaux. Dans ces dernières expériences, il est remarquable que les couples dus aux chocs des particules des deux signes s'ajoutent, au lieu de donner lieu à un effet différentiel comme dans les premières expériences.

Ces recherches ont finalement amené l'auteur à supposer que les forces pondéromotrices bien connues, qui mettent en mouvement les conducteurs parcourus par un courant électrique, lorsqu'on fait agir d'autres courants ou un champ magnétique de toute autre origine, sont la manifestation des chocs produits par les électrons circulant, suivant la théorie admise aujourd'hui, à l'intérieur des conducteurs et constituant ainsi le courant

Pour faire bien comprendre cette idée, M. Righi décrit une expérience particulière dans laquelle une boîte fermée tourne dans l'espace annulaire qui reste entre les deux électrodes, à cause des chocs produits sur les parois par les ions contenus dans le gaz de la boîte, dès qu'on crée le champ magnétique parallèle à l'axe de rotation. On peut alors passer de ce cas de rotation ionomagnétique au cas ordinaire de rotation électromagnétique en substituant, au récipient contenant le gaz, un conducteur métallique puis, aux ions contenus dans les gaz, les électrons contenus dans le métal, et, enfin, aux parois du récipient, les molécules et la surface du métal, laquelle ne laisse pas passer les électrons de même que les parois s'opposent au passage des ions.

De cette manière on énonce une *théorie électronique des forces pondéromotrices* agissant sur les conducteurs parcourus par les courants. Cette théorie conduit à une expression des forces en fonction de l'intensité du champ et de l'intensité du courant, tout à fait identique à l'expression bien connue.

La théorie nouvelle comble une lacune restée jusqu'ici dans la théorie électronique des métaux. On sait que, par cette théorie, on explique d'une manière satisfaisante les phénomènes connus, comme la proportionnalité entre les conductibilités électrique et calorifique, l'électricité de contact, les phénomènes thermo-électriques, etc., et aussi les phénomènes (de Hall, galvanomagnétiques, etc.) dans lesquels intervient l'action d'un champ magnétique; mais les forces mettant en mouvement les conducteurs parcourus par les courants électriques étaient demeurées en dehors de la théorie électronique.



BIBLIOGRAPHIE.

Tables annuelles de Constantes et Données numériques de Chimie, de Physique et de Technologie, publiées par le Comité international de Chimie appliquée (M. C. Marie, secrétaire général), Fascicule B (extrait du Volume III) : *Données numériques d'électricité, de magnétisme et d'électrochimie*. Année 1912. Paris, Gauthier-Villars et C^{ie}, 1914.

Le *Bulletin* a rendu compte, lors de l'apparition successive des deux premiers volumes, en 1913 et 1914, de l'importance et de l'utilité de cette publication annuelle; rappelons seulement qu'on y trouve « une foule de renseignements utiles, non seulement pour les travaux d'avant-garde », a dit M. Maurice Leblanc, président de la Commission électrotechnique internationale, « mais aussi pour les travaux les plus courants ».

Le fascicule B, tout récemment paru, contient, dans ses 79 pages de tableaux, les données suivantes publiées au cours de l'année 1912, dans les périodiques scientifiques et techniques du monde entier : *Électricité et magnétisme; conductibilité des électrolytes; forces motrices*.

Il est donc particulièrement intéressant pour les électriciens.

Annuaire du Bureau des Longitudes pour l'année 1915, 1 vol.
Paris, Gauthier-Villars et C^{ie}.

L'*Annuaire* publié par le Bureau des Longitudes pour l'année 1915, si précieux par le nombre des documents qu'il contient, vient de paraître. Cet excellent Recueil renferme cette année, après les documents astronomiques, des Tableaux relatifs à la Métrologie, aux Monnaies, à la Géographie, à la Statistique et à la Météorologie.

Cet Ouvrage ne se trouvera pas seulement sur la table du technicien, du physicien, du mathématicien : chacun voudra le consulter pour avoir sous les yeux la liste des constantes usuelles, et aussi pour lire l'intéressante Notice de cette année : *Les méthodes d'examen des miroirs et des objectifs* (avec 78 figures), par M. G. BIGOURDAN.

IL Y A TRENTE ANS.

Février 1885. — Mesure des faibles résistances : le microhmmètre, par M. L. MAICHE.
— Allumoirs à gaz électriques et chercheurs de fuites de M. E. Arnould, par M. D. NAPOLI. — Le thermomicrophone, par M. le Dr J. OCHOROWICZ.

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ INTERNATIONALE
DES
ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Compte rendu de la réunion mensuelle du 4 mars 1915 : Décès, p. 65. — Distinctions honorifiques p. 66. — Proposition relative au maintien provisoire du *statu quo*, p. 67. — Préparation du bore; ses propriétés; son application (M. H. Chaumat), p. 69. (Observation de M. Matignon.)
RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES, p. 98.
BIBLIOGRAPHIE, p. 100.
IL Y A 30 ANS, p. 100.

COMPTE RENDU

DE LA

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du jeudi 4 mars 1915 ⁽¹⁾.

PRÉSIDENCE DE M. BRYLINSKI.

La séance est ouverte à 17 h 5 m.

Le procès-verbal de la dernière réunion mensuelle est adopté.

M le PRÉSIDENT fait part de nouveaux décès parmi les membres de la Société victimes de la guerre : MM. *Brizon* (René), tué à Noulettes, le 20 décembre 1914; *Chillaz (de)*, chef d'escadron d'artillerie, tué à la bataille de la Marne; *Jouglà*, cité à l'ordre du jour et nommé chevalier de la Légion d'honneur, blessé le 8 dé-

(¹) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

cembre au bois d'Aprémont et décédé le 22 janvier à l'hôpital de Toul; *Legoupil*, tué à l'ennemi; *Martinroche*, blessé d'un éclat d'obus le 13 septembre à Fontenoy, est décédé le 20 septembre à l'hôpital de Rouen; — il en exprime de vifs regrets et adresse aux familles de ces sociétaires les condoléances émues de la Société.

En outre, ont été faits prisonniers : MM. Clin (E.), interné à Zossen; Jouvion (M.), blessé et interné au camp de Niedergwehren, près Cassel.

D'autre part, rompant sur ce point avec la tradition observée par la Société et s'autorisant des raisons de circonstances exceptionnelles qui les ont motivées, M. le PRÉSIDENT annonce les nominations dans l'ordre national de la Légion d'honneur dont les Membres ci-après de la Société ont été l'objet pour faits de guerre ou leur collaboration spéciale à l'œuvre de la Défense nationale :

Au grade d'officier :

M. Belugou (V.), ingénieur en chef des Télégraphes, directeur de Télégraphie militaire.

Au grade de chevalier :

M. Cellerier (J.-F.), directeur du Laboratoire d'essais du Conservatoire des Arts et Métiers; cité à l'ordre du jour de l'Armée :

« Capitaine au 2^e régiment d'artillerie lourde, a fait preuve d'une ingéniosité et d'une activité remarquables en imaginant et en construisant avec des moyens de fortune, un lance-bombes capable de répondre aux « minenwerfer » ennemis; a rendu, par la mise en œuvre de ce matériel, des services signalés aux troupes, et a contribué pour une large part à leur résistance victorieuse. »

M. Parodi (H.), ingénieur en chef du Service électrique de la Compagnie des Chemins de fer d'Orléans; cité à l'ordre du jour et promu capitaine :

« Lieutenant de réserve au 5^e régiment d'artillerie, s'offre volontairement toutes les fois que se présente une mission très périlleuse à remplir. A observé le tir des tranchées les plus avancées non seulement pour les réglages, mais au plus fort des attaques sous le feu le plus intense de l'artillerie ennemie. Fanatique du métier, a renoncé, pour redevenir lieutenant d'artillerie, aux quatre galons que lui conférait sa haute situation dans les chemins de fer. »

M. Routin (J.-L.), ingénieur en chef du service de l'Artillerie de la Maison Breguet et mobilisé comme capitaine du Génie, nommé sur la proposition du Ministre de la Marine.

Des applaudissements accueillent cette communication.

M. le PRÉSIDENT expose ensuite les difficultés de la situation résultant de l'absence d'un grand nombre de sociétaires mobilisés, situation qui rend impraticable l'observation régulière des prescriptions statutaires à l'égard du renouvellement annuel des administrateurs et commissaires de la Société dont l'élection manquerait dès lors d'autorité; en conséquence, il donne lecture de la Résolution suivante adoptée par le Comité d'administration dans sa séance du 24 février 1915 et qui sera soumise à la sanction de la prochaine Assemblée générale :

« Le Comité d'administration a décidé, en raison des circonstances actuelles, de proposer à l'Assemblée générale du 1^{er} avril 1915 :

» 1^o Le maintien provisoire en fonctions des membres du Bureau, du Comité d'administration et de la Commission des Comptes;

» 2^o Ainsi que, notamment, le renouvellement du mandat de M. F. Brocq, comme trésorier de la Société, jusqu'à ce que le retour à la vie normale, qui suivra la cessation des hostilités, permette de procéder à de nouvelles élections. »

L'ordre du jour appelle les Communications techniques.

**PRÉPARATION DU BORE PUR, SES PROPRIÉTÉS, SES APPLICATIONS,
D'APRÈS LES TRAVAUX DE E. WEINTRAUB.**

M. H. CHAUMAT. — « Mes chers Collègues, en prenant la parole ce soir, je salue la mémoire de mes deux collaborateurs les plus directs, Millien et Le Bœuf, tombés héroïquement au champ d'honneur.

» L'École supérieure d'Électricité a fait en eux la plus cruelle et la plus irréparable des pertes. Au cours de quelques années de travail en commun, nul plus que moi n'a pu apprécier leur valeur et leur caractère. Je leur ai souvent demandé beaucoup : je n'ai jamais pu connaître la limite de leur dévouement.

» Mais les sacrifices continuent. Nous devons nous efforcer de détourner les yeux de la lutte gigantesque qui se poursuit, pour regarder, par delà les tombeaux, vers un avenir que nous devons préparer. C'est donc, pour tous ceux qui ne se battent pas, un devoir impérieux que de maintenir le plus possible l'activité de leur milieu en y consacrant, jusqu'au bout, toutes leurs forces.

» Notre Président l'a dit excellemment : nous allons examiner froidement quelques questions techniques, comme si la paix régnait encore sur le monde. Et nous vous avons convié à entendre ce soir un peu de Chimie.

» La préparation du bore pur, ses propriétés, ses applications, c'est là un titre un peu singulier pour une communication à une société d'ingénieurs électriciens, et le sujet paraît un peu en dehors de vos préoccupations journalières. J'espère vous montrer que ce n'est là qu'une apparence. Si le bore a pu être isolé, ce n'est que grâce aux moyens d'investigation et de travail à la fois précis et extraordinairement souples et puissants que l'électricité a mis à la disposition des chercheurs. Et, d'autre part, certaines applications du bore prennent déjà un développement important : il se trouve que c'est la technique de l'électricité qui, la première, a bénéficié des propriétés singulières de cet élément.

» C'est au cours d'une vaste enquête sur les matières propres à la fabrication des filaments de lampes à incandescence que le

Dr E. Weintraub a abordé l'étude du bore. Ses travaux ont été poursuivis au Laboratoire de recherches de la General Electric Company à West Lynn (Massachusetts, U. S. A.). Ce sont les principaux résultats obtenus par Weintraub que je vous exposerai ce soir. Il m'a paru intéressant de les faire connaître, pour la première fois, à un public français ⁽¹⁾.

» L'isolement du bore présente les plus grandes difficultés, surtout en raison de l'extraordinaire affinité de ce corps pour les autres éléments.

» Quand on ouvre un Traité de Chimie un peu ancien, c'est-à-dire remontant à quelque 30 ans, on est frappé de la diversité des procédés de préparation indiqués pour le bore et aussi des différences de propriétés présentées par les corps décrits sous le nom de *bore* :

» Il y a le *bore amorphe* de Gay-Lussac et Thénard obtenu en 1807 par la réduction de l'anhydride borique par le potassium. C'est une substance brun chocolat clair.

» Vöhler et Deville obtiennent, en réduisant l'anhydride borique par le sodium dans un creuset de fer, une poudre verte que l'on a cru longtemps être du *bore amorphe*, et qui contient de nombreuses impuretés, notamment du borure de sodium, du borure de fer, de l'azoture de bore et de l'oxygène.

» Enfin, on décrivait, sous le nom de *bore cristallisé* ou *adaman-tin* de Deville, un corps obtenu par l'action réductrice de l'aluminium sur l'anhydride borique fondu. La réaction se fait dans un creuset de charbon. On obtient, après attaque par l'acide chlorhydrique et divers réactifs, des cristaux limpides et transparents, de couleur jaune de miel, d'une dureté comparable à celle du dia-

(1) Voici la liste des publications de E. Weintraub sur le bore :

1° *Preparation and Properties of Pure Boron* (*Transactions of the American Electrochemical Society*, 16^e Congrès général, octobre 1909, vol. 16, New-York).

2° *Sur l'emploi du bore dans le moulage du cuivre* (*Transactions of the American Electrochemical Society*, vol. 18, 1910).

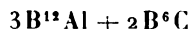
3° *On the Properties and Preparation of the Element Boron* (*Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 3, n° 3, mai 1911).

4° *Boron* (8^e Congrès international de Chimie appliquée, 1912, vol. 26, p. 627).

mant. L'analyse montre que ces cristaux contiennent :

Carbone.....	4,2
Aluminium.....	6,7
Bore.....	89,1

» C'est loin d'être du bore pur, comme on le voit. On a décrit depuis deux borures d'aluminium répondant aux formules B^2Al , $B^{12}Al$, un carbure de bore de formule B^6C et une combinaison définie de borure d'aluminium et de carbure de bore répondant à la composition



qui se présente sous la forme de cristaux très durs.

» Moissan a repris tous les travaux, en vue de l'obtention du bore pur, en 1895. Il a montré que la réaction la plus convenable était la réduction de l'anhydride borique par le magnésium. Si l'anhydride borique est en excès par rapport à la proportion théorique, le produit obtenu ne contient que quelques centièmes de magnésium. En fondant ce produit avec 50 fois son poids d'anhydride borique, on obtient un corps contenant 98 et même 99 pour 100 de bore. C'est le bore amorphe de Moissan, d'une couleur brun clair. Il faut dire que Moissan n'en a préparé que de très petites quantités et n'a publié qu'un très petit nombre d'analyses.

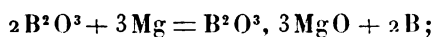
» Weintraub a repris l'étude de cette réaction fondamentale en s'efforçant d'obtenir une masse de fusion homogène. En faisant varier dans de très grandes limites les proportions du mélange ainsi que la température, il a pu obtenir trois sortes de produits qui contenaient, outre du bore, soit une forte proportion de magnésium, soit une forte proportion d'oxygène, soit à la fois du magnésium et de l'oxygène. Mais il lui a été impossible d'obtenir du bore pur malgré tous les moyens d'action employés par lui, d'une précision et d'une puissance inconnues à ses devanciers.

» Il a dès lors dû imaginer des méthodes toutes nouvelles qui lui ont donné le résultat cherché et l'ont conduit à préparer le bore à l'état pur, sous forme d'une masse fondue, homogène.

» Ce premier résultat a permis à Weintraub d'étudier à fond les propriétés du bore, de comprendre mieux les causes des échecs de ses prédécesseurs. Il est alors revenu à la réduction de l'anhydride

borique par le magnésium et, en utilisant les sous-produits impurs donnés par cette réaction, il a pu organiser une véritable fabrication industrielle de l'élément, par masses de plusieurs kilogrammes.

» *Étude de l'action réductrice du magnésium sur l'anhydride borique.* — La réaction théorique correspond à la formule



soit, en poids, 140 parties d'anhydride borique pour 72 parties de magnésium.

» La réaction est très fortement exothermique.

» Si l'on emploie les proportions théoriques, soit sensiblement 2 parties d'anhydride borique pour 1 partie de magnésium, on obtient régulièrement un produit contenant une proportion considérable de magnésium. C'est plutôt un borure de magnésium qu'autre chose.

» Moissan a indiqué une proportion des constituants de 3 à 1 (anhydride borique en excès). Le produit de la fusion comprend des parties colorées en noir, riches en magnésium, et d'autres parties d'une très légère couleur brune. Ce sont ces parties peu colorées, qui, traitées par l'eau et les acides, donnent à Moissan :

» 93 à 94 pour 100 de bore;

» 3 à 4 pour 100 de magnésium;

» 1,5 pour 100 d'une matière indéterminée insoluble dans les acides.

» Weintraub a obtenu des résultats analogues avec des irrégularités qui peuvent tenir à des défauts d'homogénéité. Il faut en effet trier dans la masse les parties noires riches en magnésium.

» Les premiers efforts de Weintraub se sont portés sur l'obtention d'une masse de fusion homogène. Il y est arrivé d'abord en opérant dans des fours à gaz sur des masses de matière plus considérables, ce qui permettait d'obtenir des températures plus élevées. Il a ainsi obtenu une masse brune, sensiblement plus claire] que celle de Moissan, et une mince couche périphérique noire, très facile à séparer.

» L'analyse montre que la masse brune est pratiquement libre de magnésium: elle en contient à peine plus d'un millième. Mais le dosage du bore donne seulement 83 pour 100. En tenant compte des autres impuretés dosables, on trouve un déchet dans le dosage de près de 15 pour 100.

» Le résultat est déconcertant. Weintraub s'attendait à trouver du bore pur.

» L'ancien procédé de Moissan donnait comme écart entre le poids total et le poids des éléments dosés seulement 4 à 5 pour 100.

» L'analyse de la mince couche noire périphérique donne 92 pour 100 du bore et 1,5 pour 100 de magnésium. Le produit le plus riche en bore est aussi le plus riche en magnésium et la somme des éléments dosés atteint 94 pour 100 au lieu de 85.

» Des résultats analogues et plus constants sont donnés par le four électrique, plus facile à régler avec précision. On opère dans le vide pour exclure l'azote que le bore absorbe avec la plus grande facilité et pour éviter la présence de l'oxyde de carbone que le bore décompose pour donner du borure de carbone.

» Si la température ne dépasse par 1700°, on a un produit qui est libre de carbone, qui renferme seulement des traces de magnésium, six millièmes environ d'azoture de bore, mais 82,5 pour 100 de bore seulement. La somme des éléments dosés atteint 84 pour 100.

» Quelle est donc cette impureté? Weintraub fait une analyse très sagace de la question; il institue une méthode de dosage du bore par le permanganate ⁽¹⁾ et il arrive à prouver que l'impureté qui constitue le déchet au dosage n'est autre que de l'oxygène. Le fait est établi d'une manière irréfutable.

» Ainsi, la réaction de Moissan, quand on la conduit de façon à obtenir une substance homogène, donne un produit contenant du bore et une proportion d'oxygène voisine de 15 pour 100. Weintraub lui donne le nom de *sous-oxyde de bore*, bien qu'il n'ait pas réussi à la séparer en des composés parfaitement définis. Ce corps ou ce mélange répond à peu près à la formule B^6O .

» En faisant varier les conditions, on peut résumer ces travaux préliminaires dans les conclusions suivantes :

(¹) Cette méthode de dosage était inconnue de Moissan.

» Une faible proportion d'anhydride borique et une température relativement basse favorisent la formation d'un produit riche en magnésium.

» Une forte proportion d'anhydride borique et une température élevée donnent un produit pratiquement libre de magnésium, mais contenant une forte proportion d'oxygène combiné.

» Avec un grand excès d'anhydride borique, la masse se dilue, la température est plus basse et l'on obtient à la fois, comme impurétés, du magnésium et de l'oxygène.

» La deuxième fusion du produit le plus riche en bore, avec un grand excès d'anhydride borique, comme le recommande Moissan, n'a pas permis d'obtenir du bore, même amorphe. On réussit bien à enlever une partie du magnésium, mais il en reste toujours quelques centièmes. Essaie-t-on d'élever la température, on réussit alors à enlever complètement le magnésium, mais l'oxygène est introduit.

» Des tentatives faites avec d'autres métaux donnent des résultats encore plus médiocres, l'affinité du bore pour la plupart des métaux étant encore plus grande que pour le magnésium.

» C'est dans une tout autre voie que le résultat devait être obtenu. Cependant, comme nous le verrons tout à l'heure, le sous-oxyde de bore ou le borure de magnésium peuvent servir d'excellents points de départ pour l'obtention du bore chimiquement pur.

» *Réduction du chlorure de bore par l'hydrogène.* — La réduction des composés halogénés du bore par les métaux alcalins ou alcalino-terreux s'est montrée infructueuse.

» La réduction par l'hydrogène a été signalée, mais n'a jamais été sérieusement étudiée.

» L'hydrogène réduit le chlorure de bore.

» L'action est très faible si l'on fait passer le mélange des deux gaz dans un tube de terre réfractaire chauffé au rouge.

» Si l'on chauffe à une température plus élevée, dans un tube de quartz, on obtient un dépôt riche en silicium. Tous les oxydes sont en effet réduits par le bore. On sait que la magnésie fait exception, mais seulement au-dessous de 1600°. A des températures voisines de 2500°, c'est au contraire le bore qui réduit la magnésie.

» La réaction de l'hydrogène sur le chlorure de bore est réver-

sible. Au rouge, un courant de gaz chlorhydrique que l'on fait passer sur du bore donne du chlorure de bore, mais aux températures très élevées, c'est la réaction inverse qui se produit. Il y aura donc une teneur en hydrogène, gaz chlorhydrique et chlorure de bore déterminée pour une température déterminée, et l'on constatera le phénomène de rétrogradation bien connue dans la fabrication de l'acide nitrique par l'arc électrique. On peut donc songer, comme pour la fabrication de l'acide nitrique, à utiliser un arc électrique. L'arc permet de localiser dans un très petit volume la production des très hautes températures et l'on peut ainsi noyer dans un grand volume de gaz froids les produits de la réaction.

» Mais les circonstances sont ici beaucoup plus favorables que dans la production des vapeurs nitreuses, où tout est gazeux, et où il est nécessaire, en utilisant des courants d'air violents, de soustraire les vapeurs nitreuses aux températures destructives.

» Dans le cas du bore, un des produits de la réaction est solide, et, en employant un arc soufflé, le bore peut être rapidement soustrait du champ de la réaction.

» On fera donc jaillir un arc soufflé dans un mélange gazeux formé d'hydrogène chargé de vapeurs de chlorure de bore ⁽¹⁾. On emploie de préférence un arc à courant alternatif pour éviter la souillure du bore par la désintégration de l'électrode négative.

» La matière des électrodes est loin d'être indifférente. Avec des électrodes de graphite, le bore obtenu contient 2 pour 100 de carbone. Heureusement le cuivre a une affinité très faible pour le bore et la solution est donnée par l'emploi d'électrodes de cuivre refroidies.

» L'hydrogène doit être employé en grand excès. Le bore est projeté en poudre sur les parois du récipient et sur les électrodes. A l'extrémité des électrodes, il s'agglomère peu à peu en baguettes, et c'est finalement entre des électrodes de bore que l'arc se produit. Les extrémités fondent peu à peu. On obtient donc du bore fondu et de la poudre de bore.

» Les morceaux fondus sont du bore rigoureusement pur. La

(¹) Le chlorure de bore bout sous la pression atmosphérique à la température de 17° C.

poudre, lavée à l'eau pour enlever des traces d'acide borique, titre de 99 à 99,5 pour 100. Le reste est sans doute du sous-oxyde de bore, car il est impossible d'éviter la présence de traces d'oxygène dans les gaz employés.

» La poudre de bore peut d'ailleurs être purifiée et fondue, comme nous le verrons tout à l'heure, par son passage dans le four à arc à mercure.

» Le chlorure de bore peut se préparer avec la plus grande facilité en faisant passer un courant de chlore sur du carbure de bore. Ce dernier produit s'obtient par le chauffage, au four électrique, d'un mélange d'anhydride borique et de charbon.

» Le bore chimiquement pur obtenu, on a pu poursuivre l'étude précise des propriétés chimiques de l'élément. La connaissance de ces propriétés a permis à Weintraub de réaliser un deuxième procédé de préparation du bore.

» Si, en effet, on fait passer le mélange d'hydrogène et de vapeurs de chlorure de bore dans un tube de graphite chauffé par le courant, on peut produire la réduction à une température à laquelle le carbone et le bore ne se combinent pas ⁽¹⁾. On peut obtenir ainsi du bore très pur. L'électricité n'intervient que pour le réglage de la température et l'on évite les difficultés de l'emploi d'un arc alternatif à haute tension.

» *Propriétés du bore.* — Le bore pur est très analogue d'aspect au diamant noir. Il peut prendre un beau poli. Il est extrêmement dur et ne le cède sur ce point qu'au diamant. Sa cassure est conchoïdale et il ne présente aucune trace de structure microcristalline. C'est le premier corps, préparé artificiellement, qui présente à la fois une grande dureté et une structure amorphe. C'est là une propriété ou mieux un ensemble de propriétés très remarquable et qui justifiera certaines applications.

» Il fond à une température très élevée, voisine de 2300°. Son point d'ébullition est très peu supérieur. Sa tension de vapeur est très considérable : elle est déjà très appréciable à 1200°, et,

(1) Au-dessous de 1700°.

à 1600°, elle se traduit par le noircissement très rapide des parois du récipient dans lequel le bore est chauffé.

» Cette propriété doit faire écarter immédiatement le bore de la fabrication des filaments de lampes à incandescence.

» Malgré cette grande tension de vapeur, on peut assez facilement fondre le bore, non seulement sous la pression atmosphérique, mais encore dans le vide. C'est une question de puissance calorifique assez grande pour un volume déterminé.

» La propriété la plus remarquable du bore est sa conductibilité électrique. Elle exige tout un chapitre à part que nous allons aborder tout à l'heure.

» Le bore est remarquable par son affinité pour presque tous les corps, à la seule exception du cuivre et du mercure. Son affinité pour l'azote était connue.

» Toutes ces propriétés du bore sont en harmonie avec sa place dans la classification périodique des éléments, tout à côté du carbone. Ces propriétés du bore permettent, en retour, d'affirmer certaines propriétés du carbone qui n'ont pu être étudiées d'une façon précise. C'est ainsi que, pour Weintraub, le noircissement des lampes à incandescence à filament de carbone est une simple volatilisation. C'est un phénomène purement thermique et il n'en faut pas chercher la raison dans une action chimique ou dans des décharges électriques. Le carbone est trop près du bore dans la classification périodique pour n'avoir pas, lui aussi, une tension de vapeur notable aux environs de 1700°.

» *Conductibilité du bore.* — Le bore est un conducteur très médiocre à la température ordinaire.

» A 23° C. sa résistivité est de $1,7 \times 10^6$ ohms-centimètres, soit 10^{12} fois la résistivité du cuivre (Moissan avait donné, en 1892, 8,01 mégohms-centimètres).

» On voit que, à froid, le bore est plutôt dans la catégorie des isolants industriels (la résistivité de la fibre vulcanisée varie entre 3 et 60 mégohms-centimètres).

» Mais ce qui distingue le bore par-dessus tout, c'est que la conductibilité croît avec la température dans des proportions considérables.

» Entre 23° C. et le rouge sombre, la conductibilité croît dans le rapport de 1 à 2 millions. Au rouge blanc, c'est un bon conducteur ⁽¹⁾.

» Comme on le dit généralement, en envisageant la résistivité et non la conductibilité, le bore a un *énorme coefficient de température négatif*.

» Voici un Tableau de mesures effectuées par Weintraub sur un échantillon déterminé de bore fondu (Tableau publié en 1909) :

Température.	Résistance (en ohms).
0	
27.....	5 620 000
45.....	2 590 000
60.....	1 500 000
70.....	1 060 000
80.....	758 000
90.....	560 000
100.....	395 000
110.....	285 000
120.....	238 000
130.....	194 000
140.....	134 000
150.....	107 000
160.....	77 000
170.....	55 000
180.....	46 000

» Ce Tableau n'a aucune prétention à l'exactitude. Les mesures sont en effet très incertaines en raison du grand dégagement de chaleur dû à la résistance très élevée. Si faible que soit le courant, la température s'élève très rapidement et la résistance varie énormément. Les valeurs trouvées aux basses températures sont par suite beaucoup trop faibles.

» Voici un autre Tableau de mesures obtenu avec le même échantillon :

(¹) Aucun autre élément ne montre une variation de résistance comparable, sauf peut-être le sélénium, dans une étroite région autour de son point de fusion.

Température.	Résistance (en ohms).
140.....	107 000
160.....	55 000
170.....	40 000
180.....	30 500
190.....	22 000
210.....	13 800
220.....	10 700
250.....	5 300
280.....	2 900
290.....	2 250

» On met ensuite l'échantillon dans le vide. Au rouge sombre, visible dans une chambre noire, la résistance tombe à 5 ohms.

» Pour des intervalles de température pas trop grands, la résistance diminue suivant une progression géométrique quand la température croît suivant une progression arithmétique.

» Autrement dit, la *résistance est une fonction exponentielle de la température.*

» Ceci peut se traduire par la formule

$$R = R_0 e^{-\beta t}.$$

» Dans le voisinage de la température ordinaire, $\beta = 0,0408$, et pour une intervalle de 17°C. , la résistance tombe à la moitié de sa valeur.

» Le coefficient β décroît lentement quand la température s'élève et, au voisinage de 300° , atteint la valeur $0,0231$. C'est dire qu'au voisinage de 300° il faut un intervalle d'environ 30° pour que la résistance tombe à la moitié de sa valeur. Vers 600° , ce même intervalle est de 80°C.

» Malgré cette variation de β avec la température, on pourra, sans erreur notable, utiliser cette formule exponentielle pour des écarts de température ne dépassant pas 50° .

» Des comparaisons avec les autres conducteurs sont très instructives.

» On sait que les métaux ont un coefficient de température positif : la résistance croît quand la température s'élève.

» Les métalloïdes paraissent se comporter comme des disso-

lutions électrolytiques : la résistance diminue quand la température croît.

» On connaît depuis fort longtemps l'exemple du carbone amorphe dont la résistance tombe de 2 à 1 entre la température ordinaire et le rouge blanc.

» Pour le silicium, les mesures sont délicates en raison de la grande tendance de ce corps à la cristallisation. La résistance paraît tomber dans le rapport de 100 à 1 entre la température ordinaire et une température voisine du point de fusion (1400°).

» On sait que les oxydes métalliques présentent des phénomènes analogues : le filament de la lampe Nernst offre une grande chute mesurable seulement à 500° ou 600° .

» La chaux présente une chute de résistance analogue, surtout accentuée entre 1000° et 1500° .

» On sait que la magnésie, peu conductrice à froid, conduit assez bien au rouge blanc. Cette propriété l'empêche d'être utilisée pour le garnissage des fours électriques malgré son irréductibilité.

» L'oxyde de cuivre, d'après des mesures de Horton, présenterait ce phénomène, comme le bore, dès la température ordinaire, mais ce n'est cependant qu'à très haute température que la chute de résistance devient extrêmement rapide.

» Ce qui fait du bore un conducteur tout à fait spécial, c'est, à la fois, sa très haute résistivité à froid, son énorme coefficient de température négatif, et le fait que l'influence de la température se fait sentir dès la température ordinaire. Si bien que ce corps, qui est un isolant en soi, se comporte, sous des tensions modérées, comme un assez bon conducteur, en raison de la variation de résistance par l'élévation de température due au courant.

» La loi d'ohm est sans utilité presque au même degré que dans le cas des milieux gazeux et un conducteur de bore se comporte plutôt comme un arc que comme un conducteur solide.

» Comme dans le cas des arcs, il est impossible, sans des arrangements spéciaux, de placer deux ou plusieurs conducteurs de bore en parallèle. L'équilibre est extrêmement instable et il suffit de la moindre élévation de température de l'un des conducteurs pour que, grâce à la très rapide diminution de sa résistance, il accapare pour lui seul tout le courant.

» Le bore présente, comme les milieux gazeux, une sorte de *différence de potentiel disruptive*, dont la valeur est à peu près déterminée pour un échantillon donné. Au-dessous de cette valeur, un courant d'intensité extrêmement faible s'établit; mais si l'on fait croître un peu la différence de potentiels, le courant devient notable, le bore s'échauffe, sa conductibilité croît et la différence de potentiel tombe rapidement pour tendre à devenir constante quelle que soit l'intensité du courant. L'analogie avec un arc est immédiate et l'on est tout naturellement conduit, comme dans le cas des arcs, à étudier la loi de variation de la différence de potentiels en fonction du courant.

» *Étude de la relation entre le courant et la différence de potentiels pour un échantillon de bore déterminé* — Cette relation $U = f(I)$ n'a pas d'intérêt scientifique. La seule grandeur dont l'étude ait un sens précis est la résistance considérée comme fonction de la

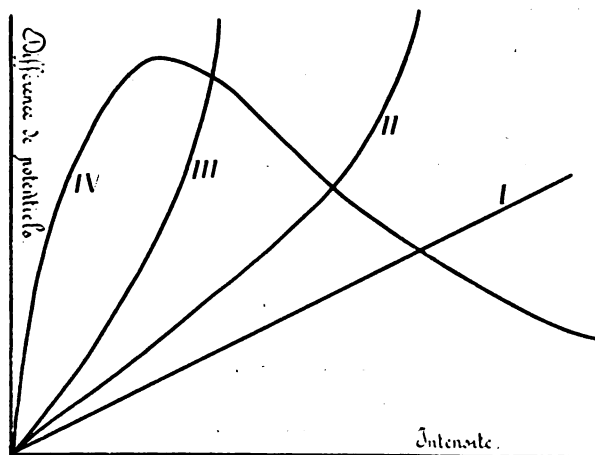


Fig. 1.

température. La relation entre U et I dépendra de la température d'équilibre prise par le conducteur, c'est-à-dire, non seulement de la nature de ce conducteur, mais encore des causes de refroidissement, c'est-à-dire de sa forme, de ses dimensions, de l'état de sa surface, des conditions du milieu.

» Envisageons donc cette fonction U de I . Nous pourrions examiner plusieurs cas et nous traduirons les résultats par une courbe

en portant en abscisses les valeurs de l'intensité, en ordonnées les valeurs de la différence de potentiels.

» 1^o Si la résistance est indépendante de la température, elle reste constante quel que soit le courant. La courbe qui traduit la relation entre U et I est donc une ligne droite dont le coefficient angulaire représente la valeur de la résistance (courbe 1 de la figure 1). C'est le cas des alliages métalliques à très faible coefficient de température (manganin, constantan, etc.).

» 2^o Pour une matière à coefficient de température positif, c'est-à-dire à résistance croissante avec la température, à mesure que le courant croît, la résistance augmente; la courbe se relève en tournant sa concavité vers l'axe des différences de potentiels (courbe 2).

» Dans certains cas, avec un très grand coefficient de température positif, il peut arriver que, dans une certaine partie, la courbe devienne presque parallèle à l'axe des différences de potentiels (courbe 3); c'est le cas du tungstène; c'est le cas du fer dans un certain intervalle.

» 3^o Pour une substance à coefficient de température négatif, l'allure générale du phénomène est représentée par la courbe 4 qui présente une branche montante, une branche descendante et un maximum.

» En effet, de la relation

$$U = RI$$

nous tirons

$$dU = R \cdot dI + I \cdot dR,$$

$$\frac{dU}{dI} = R + I \frac{dR}{dI}.$$

R est essentiellement positif, $\frac{dR}{dI}$ est toujours négatif. Pour de très petites valeurs de l'intensité, le premier terme l'emporte et $\frac{dU}{dI}$ est positif (branche montante). Pour de grandes valeurs de l'intensité, au contraire, le second terme prédomine (et d'autant mieux que R diminue) et $\frac{dU}{dI}$ devient négatif (branche descendante). Le maximum de la différence de potentiels sera obtenu pour une valeur du

courant donnée par la relation

$$I = R \frac{dI}{dR} \text{ (en valeurs absolues).}$$

» On voit qu'à une même valeur de U , au-dessous du maximum, correspondent deux valeurs possibles pour l'intensité, la branche montante est une région de stabilité, la branche descendante une région d'instabilité.

» Pour un échantillon donné, il y a donc un maximum pour la différence de potentiels. C'est cette valeur maxima qui est la *tension disruptive*.

» Mais ceci peut être plus clairement compris par des considé-

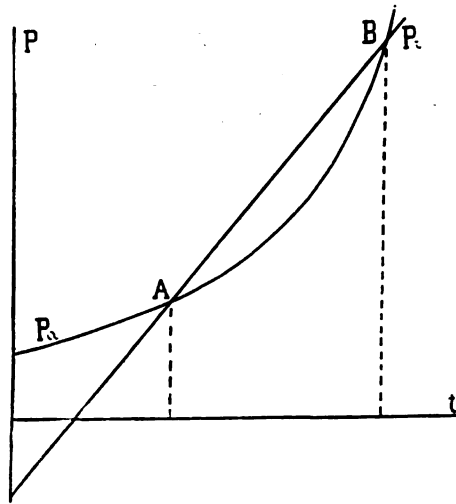


Fig. 2.

rations relatives à l'énergie reçue et à l'énergie dissipée.

» Appliquons à un échantillon donné une différence de potentiels constante U .

» La puissance absorbée est $\frac{U^2}{R}$.

» Si nous admettons que la résistance soit donnée, en fonction de la température, par l'expression

$$R_t = R_0 e^{-\beta t},$$

nous aurons pour la puissance absorbée, P_a , l'expression

$$P_a = \frac{U^2}{R_0} e^{\beta t}.$$

» C'est une courbe très rapidement croissante.

» Si nous admettons, d'autre part, que l'énergie rayonnée P_r est proportionnelle à l'excès de la température de l'échantillon sur la température τ de l'enceinte, nous aurons

$$P_r = A(t - \tau).$$

» C'est une droite.

» La température d'équilibre nous sera donnée par l'équation

$$\frac{U^2}{R_0} e^{\beta t} = A(t - \tau),$$

équation que nous ne saurons pas résoudre parce que β est une fonction inconnue de t et parce que la loi de rayonnement est beaucoup plus complexe que nous ne l'avons dit.

» Mais cela suffit pour nous donner l'allure du phénomène. La courbe P_a et la droite P_r se coupent en deux points A et B. L'un A

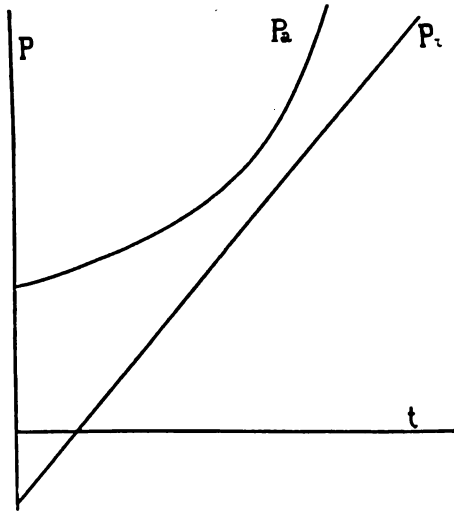


Fig. 3.

est un point stable, l'autre B est un point d'instabilité. Ce sont les deux températures, et par suite les deux valeurs de la résistance, les deux valeurs de I de la courbe précédente, correspondant à une même valeur de U .

» On voit qu'en B, pour la plus légère augmentation de la température (par une variation des conditions du milieu), l'énergie

absorbée va être constamment supérieure à l'énergie rayonnée, la température et l'intensité vont croître au delà de toute limite.

» On voit d'autre part que les deux courbes ne se coupent que pour des valeurs de U suffisamment faibles.

» Pour des valeurs de U supérieures à une certaine limite, les deux courbes ne se coupent pas. La puissance absorbée est *toujours* supérieure à la puissance rayonnée. Il n'y a pas d'équilibre possible dans l'échantillon. C'est cette valeur limite de U qui est la tension disruptive, ce que Weintraub a appelé de ce nom très imagé « *the breakdown voltage* ».

» Revenons à la courbe 4 de la figure 1 qui donne la relation entre U et I . Suivant les valeurs respectives des différents paramètres R_0 et A , la courbe peut affecter différentes formes. On en peut obtenir de très pointues, on en peut obtenir dans lesquelles la différence de potentiels tombe très lentement quand le courant croît (la tension restant presque constante pour un courant variable); mais elles ont toutes ce caractère commun de présenter un maximum, ce qui traduit graphiquement le fait de l'impossibilité de dépasser, dans un échantillon donné de bore, une certaine valeur maxima de la différence de potentiels.

» Weintraub a publié nombre de ces courbes représentant graphiquement la fonction $U = f(I)$. Je préfère vous donner un Tableau de mesures que j'ai faites rapidement sur un échantillon qui m'a été confié.

Intensité (en ampères).	Différence de potentiels (en volts).
0,020.	1,85
0,051.	3,90
0,090.	5,42
0,109.	7,10
0,128.	7,38
0,155.	7,16
0,200.	7,07
0,302.	6,52
0,502.	6,05
0,612.	5,84
0,720.	5,74
0,802.	5,56

» Ces nombres sont des moyennes et n'ont aucune prétention à la

rigueur; l'influence des conditions extérieures est en effet importante et je n'ai pas pris de grandes précautions.

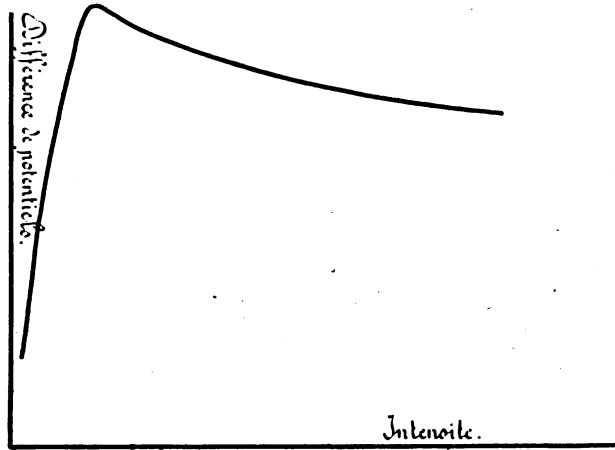


Fig. 4.

» Ces nombres sont traduits par la figure 4. Le seul aspect de la figure montre que les mesures n'ont pas porté sur du bore pur.

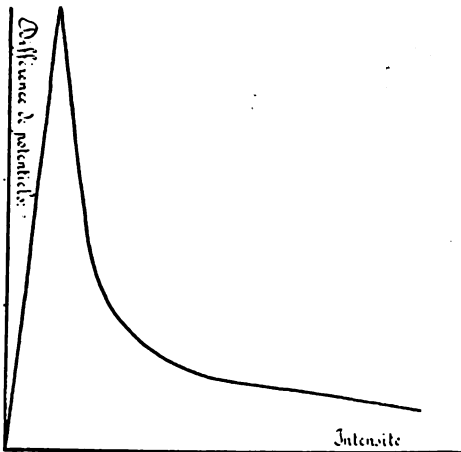


Fig. 5.

L'échantillon est en effet un régulateur de tension constitué par un alliage de bore et de carbone.

» Avec le bore les courbes obtenues sont beaucoup plus pointues. Leur aspect est donné par la figure 5.

» *Propriétés des solutions solides dans le bore.* — Si le bore est un corps très intéressant par sa conductibilité, les solutions solides dans le bore ne le sont pas moins.

» On sait que, dans le cas des métaux, la présence d'impuretés, quelles qu'elles soient, diminue la conductibilité. C'est ainsi que, bien que l'argent soit meilleur conducteur que le cuivre, la présence d'une petite quantité d'argent, dissous dans le cuivre, en diminue la conductibilité.

» Pour le bore, le contraire se produit. Un certain nombre d'éléments ont été essayés par Weintraub, le carbone, le silicium, le magnésium, l'aluminium. Ce sont les solutions de carbone dans le bore qui sont les plus remarquables et qui ont été surtout étudiées.

» La présence de quelques millièmes de carbone dans le bore en augmente la conductibilité au point que la résistance à froid peut varier dans le rapport de 12 à 1.

» Avec des proportions de carbone plus fortes, 7 à 8 pour 100, la conductibilité devient comparable à celle du silicium et même du carbone.

» Le coefficient de température, tout en restant négatif, est considérablement réduit. L'effet est si important que les mesures exactes sont très difficiles : les analyses doivent être de la plus haute précision.

» Entre le bore pur et le bore contenant 8 pour 100 de carbone, on peut obtenir à volonté un coefficient de température négatif quelconque. Avec 8 pour 100, ce coefficient de température devient normal : les propriétés si singulières du bore sont entièrement modifiées.

» Toutes ces expériences ont suggéré à Weintraub une généralisation qui offre un grand intérêt théorique. La résistance des corps bons conducteurs croît quand la température s'élève. La résistance des conducteurs médiocres diminue au contraire en même temps que leur coefficient de température négatif décroît. On peut se demander si, à des températures très élevées, tous les matériaux ne tendent pas vers des formes solides ou liquides douées de la même conductibilité.

» Les solutions solides de petites quantités de bore dans le carbone sont encore plus remarquables. On sait que toutes les variétés

de carbone amorphe, sauf une, ont un coefficient de température négatif. La seule exception est donnée par le charbon dit *métallisé* de la General Electric Company, obtenue en chauffant à très haute température, dans un four électrique spécial, du charbon déposé de la gazoline. Cette variété de carbone a une résistivité assez faible et un coefficient de température positif ⁽¹⁾.

» Le bore, à l'état de traces non dosables dans le carbone (sa présence étant décelée seulement par la couleur de la flamme), donne au carbone un coefficient de température positif, bien qu'il soit doué lui aussi, comme nous le savons, d'un coefficient de température négatif.

» Ce n'est pas là une graphitisation, comme on a pu s'en assurer, mais une action spéciale au bore. Et c'est la première fois qu'on peut ainsi donner au carbone, par un procédé purement chimique, dont le mécanisme reste mystérieux, un coefficient de température positif.

» APPLICATIONS DU BORE. — Il n'est pas possible qu'un élément qui possède un tel ensemble de propriétés remarquables ne trouve un très grand nombre d'applications. Certaines d'entre elles ont reçu déjà un développement industriel important. Nous les passerons rapidement en revue.

» La grande dureté du bore le fait employer à la fabrication de pierres pour les compteurs électriques et plus généralement pour tous les pivotages des appareils de mesure. Il se montre en cela supérieur au saphir en raison de l'absence complète de structure microcristalline. On sait que c'est par là que pèchent nos compteurs à courant alternatif. Les vibrations auxquelles ils sont soumis font que les pivots d'acier dur finissent par avoir raison de la pierre qui les supporte.

» Weintraub s'est demandé s'il serait possible d'approcher des propriétés du diamant noir de façon à faire du bore un succédané du diamant dans ses applications au forage. Ce serait un succédané à bon marché. Le bore pur s'use assez vite à la meule de car-

(¹) Ces filaments métallisés ont été utilisés, aux États-Unis, dans la lampe à incandescence Howell.

borandum. La solution sera peut-être donnée par la combinaison de bore et du carbone. La question est en cours d'étude ⁽¹⁾.

» L'influence d'une petite quantité d'autres éléments, en particulier le carbone, sur la résistivité et le coefficient de température du bore, permet de confectionner des résistances de bore pour toutes les exigences.

» Quand la courbe de variation de résistance avec la température sera exactement connue, le bore fournira le moyen le plus délicat pour la mesure des températures. On devra prendre des précautions toutes spéciales dans les mesures de résistances en raison de l'extrême sensibilité du bore au courant le plus faible. Ce sera là surtout une méthode de laboratoire.

» Dans le même ordre d'idées, le bore peut constituer un régulateur de température très précis, un bolomètre très sensible, un détecteur pour la télégraphie sans fils.

» Comme nous l'avons vu, le bore, sous des conditions déterminées, est un très médiocre conducteur pour des différences de potentiels ne dépassant pas une certaine valeur que nous appellerons *normale*. Pour des surtensions, même faibles, le bore devient bon conducteur et peut ainsi servir à constituer de véritables *soupapes* pour la protection des circuits électriques. Ces soupapes pourront être à action différée. Plus généralement, le bore pourra être employé comme *régulateur de tension*, puisqu'il est possible d'obtenir une différence de potentiels constante pour un courant variable dans certaines limites.

» En associant en série une résistance de bore, pour laquelle la différence de potentiels diminue quand le courant augmente, et une résistance métallique ordinaire à caractéristique montante, il

(1) Moissan a obtenu un *carbure de bore* en chauffant au four électrique un mélange de :

12 parties de carbone;
60 parties de bore amorphe;
160 parties de grosse limaille de cuivre.

En attaquant par l'acide nitrique, on obtient du carbure de bore mêlé de graphite.

Il se présente en cristaux noirs très durs répondant à la formule B^3C .

Le carbure de bore peut servir à la taille du diamant.

3^e SÉRIE, TOME V, 1915. — N° 40.

est possible, par un ajustement convenable, de réaliser un ensemble qui sera un véritable compensateur et pour lequel la différence de potentiels totale aux bornes sera indépendante du courant.

» Mais l'application industrielle du bore la plus importante à l'heure actuelle est certainement son emploi dans le moulage du cuivre rouge. Cette question mérite de fixer l'attention des électriciens.

» *Moulage du cuivre rouge.* — Le cuivre est (ou plutôt était) un métal impossible à mouler convenablement.

» Le cuivre fondu dissout en effet les gaz, en particulier l'oxygène. Le gaz absorbé se libère en partie à froid. D'où des soufflures, un manque d'homogénéité et une basse conductibilité électrique.

» On peut éviter cet inconvénient par l'emploi des désoxydants connus, tels que le magnésium, le phosphore, le zinc. On réussit, de cette façon, à obtenir des fontes de cuivre homogènes. Mais pour enlever pratiquement tout l'oxygène, il faut employer un excès du réducteur. Cet excès s'allie au métal et, si les propriétés mécaniques restent intéressantes, il en résulte une diminution considérable et bien connue de la conductibilité.

» Le corps idéal serait une substance sans affinité pour le cuivre à la température de fusion de ce métal, mais ayant cependant beaucoup d'affinité pour l'oxygène. Cette substance est le bore.

» Le bore lui-même est trop coûteux. Le sous-oxyde de bore se montre parfait, d'autant plus qu'on peut l'obtenir en poudre très fine.

» Les premiers essais, faits en incorporant au métal $\frac{1}{1000}$ de son poids de sous-oxyde de bore, ont donné des fontes de cuivre d'une conductibilité de 94 pour 100.

» La méthode est une bonne méthode industrielle, car on peut faire varier la proportion de sous-oxyde de bore de $\frac{3}{10000}$ à $\frac{1}{100}$, c'est-à-dire de 1 à 30, sans modifier ni les propriétés mécaniques ni la conductibilité.

» Cependant, on peut faire mieux encore. La réduction de l'anhydride borique par le magnésium donne du sous-oxyde de bore, de l'acide borique en excès, du borate de potassium. Le produit brut de la réaction est finement pulvérisé et employé tel quel.

Les corps autres que le sous-oxyde de bore ne sont pas gênants, bien au contraire : ils diluent la matière active et favorisent ainsi sa diffusion dans toute la masse.

» Cette méthode est entrée immédiatement dans la pratique des fonderies. On emploie de 1 à 1,5 pour 100 du produit, ce qui correspond à une proportion moyenne de $\frac{1}{1000}$ environ de sous-oxyde de bore. Le résultat obtenu dépend évidemment du cuivre primitif. Si le métal est pur, on obtient couramment des fontes de cuivre d'une conductibilité de 97,5 pour 100.

» La dépense est de l'ordre de 8 à 9 centimes par kilogramme de cuivre, avec des prix normaux de magnésium et d'acide borique.

» L'intérêt de cette nouvelle méthode industrielle est considérable et peut s'envisager à deux points de vue :

» 1^o On réalise une grande économie de main-d'œuvre en remplaçant le cuivre forgé par du cuivre fondu.

» 2^o La fonte de cuivre pourra remplacer les alliages dans nombre de cas ; le gain de conductibilité permettra d'économiser la matière.

» Ce procédé a trouvé des applications immédiates à la réalisation des enroulements ou de certaines parties des enroulements de transformateurs de gros calibre. La possibilité de fondre le cuivre en lui conservant une excellente conductibilité permet d'éviter, dans la construction, les joints plus ou moins bons, les rivets, les écrous.

» Des essais ont été faits pour employer le bore au cours même du raffinage du cuivre, au moment de l'opération terminale connue en France sous le nom du *perchage*. J'ai eu l'occasion d'entretenir de cette question notre collègue Vuigner, l'éminent spécialiste de la métallurgie du cuivre. La question est d'un tel intérêt que je ne résiste pas au désir de faire encore un peu de Chimie.

» Le raffinage du cuivre comporte deux phases :

» 1^o Une *phase oxydante*, dans laquelle on fond le cuivre à l'air. Il se forme de l'oxydure de cuivre qui se dissout dans le cuivre fondu et sert de véhicule à l'oxygène pour oxyder, dans toute la masse, les impuretés (fer, plomb, arsenic, antimoine, etc.). Ces oxydes viennent flotter à la surface et se scorifient plus ou moins en empruntant de la silice aux parois. Quand cette phase est ter-

minée, ce qu'on reconnaît à la cassure spéciale dite en *grain de son* des éprouvettes, on a du cuivre contenant 12 pour 100 d'oxydure.

» 2^o Cette phase oxydante est suivie d'une phase *réductrice* ou *perchage*. Le cuivre est maintenu fondu sous une couche de poussier de charbon. On remue avec des perches de bois vert. Ces perches sont de véritables arbres dont on consomme successivement plusieurs dans les grands fours américains. L'opération est assez délicate. Il ne faut pas aller trop loin pour ne pas réduire les impuretés qui peuvent rester à l'état d'oxydes non solubles dans le cuivre et que le forgeage éliminera.

» Dans ces dernières années, la phase oxydante a été très perfectionnée. On insuffle de l'air pour activer la réaction. On emploie de la magnésie au lieu de silice pour le garnissage des fours ; on évite ainsi de scorifier une partie de l'oxyde de cuivre.

» Le perchage s'est conservé depuis les temps les plus anciens sans modifications.

» Il est peu probable que le bore puisse être employé économiquement pour réduire les 12 pour 100 d'oxydure de cuivre. Peut-être le bore sera-t-il employé pour parachever l'opération. Le parole est aux spécialistes. Le champ reste vaste pour l'emploi du sous-oxyde de bore dans le moulage du cuivre et les constructions électriques.

» *Préparation industrielle du bore.* — Nous savons que Weintraub est arrivé à préparer pour la première fois du bore pur en réduisant le chlorure de bore par l'hydrogène en excès à la très haute température produite par un arc alternatif à haute tension. On obtient ainsi du bore absolument pur en poudre ou en fragments fondus de forme irrégulière.

» Ce procédé se prête assez difficilement à une production par grandes quantités.

» Ultérieurement, la connaissance plus complète des propriétés du bore et de ses principaux composés a permis à Weintraub de mettre au point un procédé tout à fait industriel.

» La réaction initiale est la réaction entre l'anhydride borique et le magnésium.

» Dans certaines conditions, on obtient du sous-oxyde de bore; dans d'autres conditions, on obtient un mélange de bore et de borure de magnésium. Ce sont ces produits de la réaction : sous-oxyde de bore, bore mélangé de borure de magnésium, qui nous serviront de point de départ.

» Ces composés sont dissociables. Quelle que soit l'impureté, elle se sépare du bore quand le bore impur est chauffé à une température voisine de son point de fusion. La principale difficulté a été d'obtenir des températures égales ou supérieures à 2000°, d'une façon industrielle, sans employer le charbon sous n'importe quelle forme en raison de la grande affinité du bore pour le carbone à cette température. Le bore décompose en effet, sans exception, tous les gaz contenant du carbone.

» La nécessité d'exclure le carbone des appareils de fabrication nous conduit forcément à opérer la dissociation par un arc jaillissant entre des électrodes de cuivre refroidies par l'eau.

» Le sous-oxyde de bore est pratiquement un isolant, aussi on emploie un arc à haute tension (15000 volts). Le sous-oxyde de bore est placé dans une coupe de cuivre massif formant une électrode; l'autre électrode est amenée au-dessus, elle est de forme cylindrique. On doit opérer dans un gaz inerte qui est l'hydrogène. L'arc doit donc se produire dans une enceinte close formée par une sorte de capuchon de fer muni d'une fenêtre qui permet de surveiller l'opération. Quand la masse est à peu près fondue, on réduit la tension à 2200 volts, le courant étant alors de 50 ampères. On termine enfin avec un arc à courant continu de 500 volts et 200 à 300 ampères qui permet de fondre plus de 2 kg de bore en une seule opération ⁽¹⁾.

» Tant que le bore contient des impuretés, il n'y a aucun danger de contamination par la matière de l'électrode supérieure, mais, à mesure que l'affinage avance, le danger devient grand. On peut exceptionnellement atteindre une teneur en bore de 99 pour 100. Pratiquement, on se limitera à 97 ou 98 pour 100. Cela peut suffire pour certains usages du bore, mais non pour d'autres.

» Lorsqu'on veut obtenir du bore pur, il faut renoncer à l'emploi

(1) La coupe de cuivre contenant le bore constitue l'anode.

des électrodes de cuivre et l'on produit la dissociation dans un four à arc à mercure. Il n'y a là aucun danger de contamination à craindre, surtout en raison de la température extraordinairement élevée que l'on peut atteindre.

» Le *four à arc à mercure*, qui est non seulement un merveilleux instrument de recherches, mais encore un véritable outil indus-

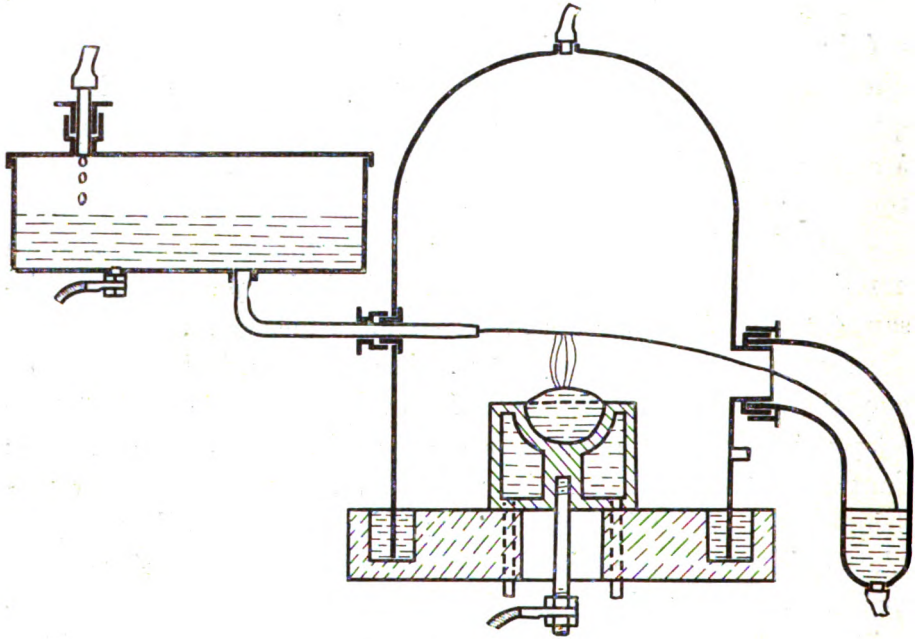


Fig. 6.

triel, n'a encore jamais été décrit, à ma connaissance, dans une publication française et je vous en dirai quelques mots.

» Il a été employé d'abord pour la fusion et la purification des métaux les plus réfractaires, comme le tungstène, l'osmium, le thorium, en employant comme anodes, dans un arc à mercure jaillissant dans le vide, des baguettes obtenues par compression des poudres de ces métaux.

» Je décrirai succinctement la dernière forme de ce four, plus particulièrement adaptée au traitement du bore, et j'emprunterai la description et le schéma à la patente anglaise de 1912 (voir *fig. 6*).

» L'espace où se produit l'arc est une cloche de fer, de cuivre ou de verre reposant sur un socle de talc par un joint étanche formé

par une rigole de mercure. Une capsule de cuivre rouge massif refroidie par l'eau sert d'anode et de support pour la charge de sous-oxyde de bore.

» La cathode est constituée par un filet de mercure amené par un tube de quartz et qui passe au-dessus de la charge à fondre, à une distance convenable. Ce filet de mercure provient d'un réservoir spécial.

» L'arc peut être amorcé par une décharge de haute tension. On peut aussi amener d'abord le filet de mercure en contact avec l'anode ; on augmente la pression, l'arc normal s'établit et le jet de mercure cathodique est reçue dans une chambre latérale. Cette chambre est en verre ou possède un regard pour l'observation de l'arc.

» Le principal avantage de ce dispositif est que l'électrode vaporisable est constamment renouvelée et refroidie par là même. On peut ainsi employer des arcs de très grande puissance. Les matériaux réfractaires peuvent être mis en œuvre à l'état pulvérisé. Il n'est pas nécessaire de les comprimer sous forme cohérente ou de les mouler avec un agglutinant.

» Ce four permet de fabriquer en grandes masses du bore chimiquement pur à l'état fondu.

» *Fabrication du bore ouvré.* — L'obtention du bore sous des formes déterminées est un problème très difficile. N'oublions pas que le bore fond à 2300° . On ne peut pas songer à le couler : la matière propre à constituer le moule et le récipient nous manque et les coulées à des températures pareilles sont pratiquement impossibles : la substance se figerait trop rapidement.

» D'autre part, il est impossible d'agglomérer le bore par simple compression. L'emploi de matières liantes risque d'introduire des impuretés.

» Il faut donc tasser fortement la poudre de bore et l'agglomérer par le courant. Mais, en raison du coefficient de température négatif très élevé, il se produit, sous l'influence des causes les plus minimes, des directions privilégiées pour le passage du courant, et l'on ne peut obtenir une matière homogène.

» Il est nécessaire, pour éviter toutes les causes extérieures de refroidissement, d'entourer le bore d'une matière qui soit un bon

isolant calorifique, qui ne fonde pas à 2300°, qui ne soit pas conductrice de l'électricité à cette température et surtout qui soit sans action sur le bore. Après de longues recherches, la solution a été donnée par une substance que l'on connaissait depuis longtemps, mais dont les travaux de Weintraub ont mis en relief les précieuses propriétés : c'est l'*azoture de bore*.

» Ce corps est infusible et non dissociable même à la température de fusion du tungstène. C'est un isolant électrique parfait : à 1200°, sous une épaisseur de 3 mm, une différence de potentiels de 500 volts ne donne pas trace d'un courant mesurable.

» Cette substance est donc tout indiquée pour constituer des fours à agglutiner les substances les plus réfractaires, comme le bore, le carbure de bore, le tungstène, etc., et le *four à azoture de bore* est une nouvelle conquête de ces longs travaux de recherches. Ce four est devenu un auxiliaire important des laboratoires industriels.

» Je terminerai là mon exposé. Les premières publications de Weintraub sur le bore remontent à 1909 et les dernières à ma connaissance, à 1912. Chaque année s'est signalée par des progrès très remarquables. Il y a eu, de la part du savant directeur du Laboratoire de recherches de West Lynn, un effort admirable. Mais ce qui est non moins digne d'être admiré, c'est l'organisation d'un Laboratoire industriel unique au monde et la puissance et la variété des moyens d'action que la General Electric Company a su mettre à la disposition de E. Weintraub.

» Je vous remercie de l'attention que vous avez bien voulu m'accorder.

» Mes chers Collègues, nous faisons tous beaucoup de réflexions, depuis le début de la guerre, sur les sujets les plus variés. Nous en faisons surtout sur la valeur de la puissance d'organisation méthodique. Beaucoup d'entre nous n'ont certes pas attendu la guerre pour fixer leur esprit sur ce point.

» Permettez-moi, en terminant et en vous remerciant encore, d'appeler vos méditations sur l'intérêt que présentent, pour les industriels, les laboratoires largement dotés. »

M. MATIGNON dit n'avoir rien à ajouter à la Communication si

claire, si complète et si bien présentée de M. Chaumat. En somme, tant que nous n'avons eu que le bore en poudre à notre disposition, nous ne connaissions aucune des propriétés physiques de cet élément. Nous étions, vis-à-vis de lui, dans la même situation que Wöhler qui avait obtenu en 1827 l'aluminium sous la forme d'une poudre noire divisée qui ne pouvait laisser entrevoir aucune des propriétés de l'aluminium en lingot, préparé pour la première fois par Deville.

Les propriétés de l'acide borique, corps facilement fusible, donnent au bore, agent réducteur, une physionomie à part. Quand on affine un métal ou un alliage, après coulée, en lui ajoutant de petites quantités de corps réducteurs, magnésium, aluminium, etc., pour détruire les oxydes formés et améliorer par cette disparition les propriétés mécaniques du métal, les oxydes d'aluminium, de magnésium, etc., résultant de la réaction, sont des corps réfractaires qui s'éliminent assez difficilement de la masse; l'acide borique est au contraire un excellent fondant, de densité spécifique assez faible, de grande volatilité, qui doit se séparer rapidement de la masse métallique.

M. le PRÉSIDENT remercie M. Chaumat de la très intéressante excursion qu'il vient de nous faire faire, en compagnie de M. Weintraub, dans le domaine de la Chimie et qui montre avec une netteté particulière combien étroits sont les liens entre l'Électricité et la Chimie. Les propriétés du bore au point de vue électrique sont d'ailleurs des plus remarquables et particulièrement dignes de notre attention. M. Chaumat nous en a fait un exposé saisissant et attachant dont il y a d'autant plus lieu de lui être reconnaissant qu'il a préparé son importante communication sans interrompre en rien la lourde tâche quotidienne que lui imposent les importantes fonctions qu'il remplit avec un inlassable dévouement à l'École supérieure d'Électricité.

La séance est levée à 18 h 30 m.

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES.

Expériences sur les transformateurs de ligne, par D. W. ROPER (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, mai 1914).

Cette Communication analyse les causes des accidents de transformateurs sur le réseau de la « Commonwealth Edison Co. », à Chicago, réseau comportant 5000 de ces appareils. Dans la moitié des cas où l'on a pu déterminer leur cause, les accidents eussent été évités sans grande dépense par quelques changements dans des détails de construction ou par quelques perfectionnements dans l'installation. L'auteur examine et commente la spécification type du « Bureau of Standards » pour les transformateurs de ligne. L'appareil étant en place, monté sur son poteau, la plaque indicatrice doit être facile à lire. Ses poignées doivent être commodés afin qu'on puisse manutentionner le transformateur sans avoir la tentation de le prendre par ses bornes ou par ses porcelaines. Le support des connexions terminales primaires et secondaires mérite une grande attention : l'huile doit le recouvrir complètement, ainsi que le circuit magnétique et les bobinages; car s'il n'est pas submergé, ce support des connexions est le siège de nombreux accidents pendant les orages; dans une expérience portant sur de très nombreux transformateurs, 60 pour 100 des accidents n'avaient pas d'autre cause. L'auteur donne des courbes des accidents ayant affecté quatre modèles de transformateurs; ces courbes servent de bases à une discussion sur les pertes pécuniaires respectivement entraînées par ces modèles de transformateurs (pertes dans le fer et dans le cuivre, réparations, pertes pécuniaires par suite de l'interruption du service, dépréciation). Il donne enfin des résultats d'expérience sur des transformateurs munis de parafoudres perfectionnés : les accidents furent réduits des deux tiers. Il pense qu'on pourrait éviter 80 à 90 pour 100 des accidents actuels simplement en tenant compte des deux observations principales sur les supports de bornes et les parafoudres, qu'il a faites dans sa Communication.

Expériences faites par la « Pacific Gas and Electric Co. » de Californie sur la mise à la terre du neutre, par J. P. JOLLYMAN, F. M. DOWNING et F. G. BAUM (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, mai 1914).

Cette Communication donne une courte description du réseau de distribution à 60 000 V de la « Pacific Gas and Electric Co. ». Les transformateurs sont montés en Y et le neutre est mis franchement à la terre. Cette compagnie pense que la mise du neutre au sol présente de grands avantages à la fois au point de vue des transformateurs, des lignes et de la sécurité du service. En ce qui concerne les transformateurs, les bobinages en Y ont moins de tours puisqu'ils ne doivent donner que 57,7 pour 100 de la tension que donneraient les bobinages en Δ ; la tension moyenne entre les bobinages et le neutre n'est que la moitié de la tension entre ligne et neutre; le courant de capacité est 1,73 fois ce qu'il serait dans un transformateur en Δ ; toutes ces causes améliorent le fonctionnement. En ce qui concerne la ligne, la tension maxima entre les isolateurs et le neutre mis au sol n'est que 57,7 pour 100 de la tension entre fils, et dans le cas où un fil est coupé, on peut

maintenir un service polyphasé à une sous-station avec deux fils seulement. Dans un système en Δ , cela ne pourrait se faire qu'en mettant une phase à la terre, ce qui n'est pas à recommander. Si le neutre est à la terre la chute d'un fil est immédiatement signalée et le courant peut être coupé. Dans un système en Δ , une mise à la terre par arc est souvent suivie, à cause du caractère oscillant de l'arc, de surtensions qui brisent les isolateurs en différents points du réseau. Cela ne peut se produire dans le système en Y avec neutre à la terre, car la fréquence de l'arc entre un fil et le sol est alors celle du réseau, et tout le dommage a lieu au point défectueux même. Il y a lieu de croire que les systèmes en Y ayant le neutre à la terre causent sur les lignes téléphoniques et télégraphiques moins de troubles que les systèmes en Δ .

Influence des connexions des transformateurs sur leur fonctionnement,

par Louis F. BLUME (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, mai 1914).

Les modes de connexions les plus usuels des transformateurs triphasés sont du type Δ - Δ et Δ -Y. Les avantages et les inconvénients de ces deux montages sont envisagés dans les trois cas suivants : fonctionnement normal, fonctionnement lorsqu'un transformateur est hors service, fonctionnement en cas de mise à la terre de la ligne. Cette Communication ne discute pas ce qui se passe lors des couplages, non plus que l'effet des oscillations de haute fréquence ; son but est plutôt d'étudier aussi complètement que possible les tensions auxquelles sont soumis les isolants aux fréquences relativement basses, soit dans le service normal, soit dans des cas anormaux. Ces fréquences sont, d'une part, la fréquence de l'onde fondamentale et de ses harmoniques et, d'autre part, la fréquence naturelle du réseau. L'auteur examine aussi la conduite des auto-transformateurs triphasés dans les mêmes conditions.

Étude de quelques systèmes triphasés, par Charles FORTESCUE

(*Amer. Inst. Elect. Eng.*, mai 1914).

L'auteur examine et discute les montages Y-Y, Δ - Δ , Δ -Y et Y- Δ au point de vue des particularités qui les caractérisent, des précautions à prendre pour éviter les accidents et les cas où le neutre doit être mis au sol. Il compare le Δ - Δ au Δ -Y et observe que : 1° pour les tensions modérées, le système Δ - Δ a l'avantage d'une plus grande souplesse ; 2° pour les hautes tensions, le Δ -Y est préférable à cause de sa plus grande robustesse et de son prix plus bas. Il est probable qu'un jeu de transformateurs Δ -Y causera moins de troubles lors des couplages qu'un jeu de transformateurs Δ - Δ ; 3° dans l'avenir, ce sont les transformateurs réalisés pour le montage Δ -Y qui se rencontreront le plus souvent ; 4° la pratique passée et présente indique que le montage Δ -Y est plus fréquent que le montage Δ - Δ .



BIBLIOGRAPHIE.

Cours de Mécanique physique, 2^e édition (Tome I du *Cours de Physique*),
par H. BOUASSE. Paris, Ch. Delagrave; 1 vol.

Cet important Ouvrage forme avec la *Mécanique rationnelle et expérimentale* du même auteur, un cours complet de Mécanique; il s'écarte délibérément dans la forme de sa conception des voies traditionnelles, M. H. Bouasse déclarant, dès l'abord, qu'il a « du rôle de la *Science pure, théorique et expérimentale*, une idée qui, en France aujourd'hui, est encore assez extraordinaire ».

Aussi, paraît-il intéressant de citer quelques lignes extraites, de l'Avant-Propos dans lequel il expose les considérations qui lui ont suggéré cette idée : « Les Français, dit-il, coupent la *Physique pure* en deux parties : celle des physiciens, qui a les honneurs des programmes; celle des ingénieurs qu'on passe sous silence, bien qu'elle comprenne les phénomènes usuels. Par exemple, les cours de physique insistent sur le baromètre, mais ignorent l'équilibre des corps flottants; ils s'occupent du coefficient de Poisson, mais négligent la résistance des solides.... ». Et plus loin : « Je combats, résume-t-il, pour la science pure, aide de la science appliquée. Entreprise qui semble banale : la lecture de ce Livre montrera que l'apparence est trompeuse; car il s'agit de débarrasser la Physique, science pure, de ce qui est simple exercice de Mathématiques.... »

Quoi qu'il en soit de la valeur pédagogique de ces dispositions novatrices, l'Ouvrage témoigne d'un esprit éclairé et d'une réelle maîtrise de la part de son auteur; il comprend trois Parties : La première, sous le titre *Solides isotropes*, pose les éléments de la théorie de l'élasticité des corps isotropes, présente une étude générale des déformations élastiques et traite de la résistance des matériaux, des mouvements vibratoires, de la vibration des tiges cylindriques et des plaques, des déformations permanentes des solides et de la réactivité; la deuxième, intitulée *Fluides*, est consacrée à l'hydrostatique, à l'hydrodynamique, aux ondes liquides, à la viscosité, aux tourbillons, aux ondes planes, sphériques et cylindriques, et aux cavités sonores; enfin, la troisième, *Fils et Membranes*, traite de l'équilibre des fils déformés, des vibrations des cordes, de la capillarité, de l'équilibre et de la vibration des membranes.

IL Y A TRENTÉ ANS.

Mars 1885. — Exposition d'électricité organisée par la Société à l'Observatoire de Paris : Les applications de l'électricité à l'Astronomie, par M. C. WOLF.

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ INTERNATIONALE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Compte rendu de l'Assemblée générale et de la réunion mensuelle du 1^{er} avril 1915 : Membres décédés, p. 102. — Rapport de la Commission des Comptes (M. G. Dehenne), p. 102. — Rapport du Comité d'administration (M. le Secrétaire général intérimaire), p. 109. — Compte rendu sur le Laboratoire et l'École (M. P. Janet), p. 113. — Sur les courants dans les arbres de dynamos (2^e Partie) (M. P. Girault), p. 127. — Résultats du vote sur les propositions soumises à l'Assemblée générale, p. 162.

SITUATION FINANCIÈRE ET BILAN DE LA SOCIÉTÉ AU 31 DÉCEMBRE 1914, p. 122 et 124.

OUVRAGES OFFERTS, p. 164.

IL Y A 30 ANS, p. 164.

COMPTE RENDU

DE

L'ASSEMBLÉE GÉNÉRALE ANNUELLE

ET DE LA

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du jeudi 1^{er} avril 1915 (1).

PRÉSIDENCE DE M. BRYLINSKI.

La séance est ouverte à 17 h 5 m.

Le procès-verbal de la dernière réunion mensuelle est adopté.

(1) La Société n'est pas solidaire des questions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

Il est donné connaissance des Ouvrages offerts pour la Bibliothèque de la Société (*voir* p. 164).

M. le PRÉSIDENT fait part des décès suivants en exprimant au nom de la Société les vifs regrets qu'il en éprouve et les condoléances qu'il adresse aux familles de ces sociétaires : MM. *Cohen* (Ed.), *Semichon* (G.) et *Vivarez*.

Tués à l'ennemi : MM. *Ambrières* (G. d') ; *Mainguenaud*, capitaine d'artillerie ; *Quenard* (R.), lieutenant d'infanterie, blessé le 5 septembre, décédé le 6 à l'ambulance de Bar-le-Duc ; *Rochas* (Victor), chef d'escadron d'artillerie, décédé à l'hôpital de Bruyères (Vosges), et *Rodet* (J.).

En outre, M. Beaudier (A.), officier du génie, blessé le 26 août, a été fait prisonnier à la reddition de Longwy et interné à Oberstimm, près d'Ingolstadt (Bavière) ; M. Stugocki (A.), disparu le 17 septembre, est présumé fait prisonnier à Courcy, près de Reims.

RAPPORT DE LA COMMISSION DES COMPTES POUR L'EXERCICE 1914.

M. G. DEHENNE, rapporteur. — « Messieurs, la Commission des Comptes pour l'exercice clos le 31 décembre 1914 a l'honneur de vous rendre compte du résultat de ses travaux.

» Depuis le commencement des hostilités l'un des trois membres de cette Commission, que vous avez nommée dans l'Assemblée générale du 1^{er} avril 1914, M. Cellerier, n'a pu exercer son mandat. Mobilisé comme capitaine d'artillerie, il a rendu à la défense d'éminents services, qui lui ont valu une citation à l'ordre de l'armée. La croix de la Légion d'honneur avait déjà, au mois d'août dernier, récompensé ses services militaires et civils. Vous serez d'accord avec nous pour lui adresser de vives félicitations.

» La Commission a contrôlé les écritures de votre comptabilité, vérifié l'exactitude du bilan qui vous est présenté et constaté l'existence des différentes valeurs figurant à l'actif de la Société.

» Les opérations de la Société sont, de tradition, classées en trois grandes divisions que nous examinerons successivement :

- » I. Services généraux ;
- » II. Laboratoire ;
- » III. École.

» I. SERVICES GÉNÉRAUX. — L'avoir de ce compte, qui était au 1^{er} janvier 1914 de 191321,24 fr, est passé au 31 décembre 1914 à 198987,38 fr, en augmentation de 7666,14 fr.

» Les recettes de l'exercice se sont élevées à 83455,18 fr et les dépenses à 75 789,04 fr.

» *Recettes.* — Les cotisations de l'exercice figurent aux recettes pour 33740 fr, en augmentation de 900 fr sur celles de 1913. Le produit du *Bulletin* a été de 7 265,15 fr, en diminution de 1948,80 fr sur 1913, les annonces n'ayant pu, par suite des circonstances, paraître que dans un nombre de numéros inférieur au nombre normal. La somme de 9000 fr, portée au Chapitre « Dons avec affectations spéciales », a des provenances diverses : M. Eug. Sartiaux, agissant en qualité de Président du Groupe V de l'Exposition de Bruxelles, nous a versé une somme de 6000 fr provenant de fonds abandonnés par les exposants du Groupe, pour être affectée à l'achat d'appareils. D'autre part, M. Janet a bien voulu nous remettre une subvention de 1000 fr, qui lui a été personnellement attribuée par la Caisse des Recherches scientifiques; cette somme doit être affectée à la réalisation des étalons de l'ohm. Enfin la Société technique de l'Industrie du gaz en France et le Syndicat professionnel de l'Industrie du gaz nous ont fait chacun un don de 1000 fr pour les études de l'étalon, au platine, d'intensité lumineuse.

» Nous adressons des remerciements à ces généreux donateurs.

» Nous vous devons quelques brèves explications sur la rubrique « Livre d'Or » qui apparaît pour la première fois dans nos situations.

» L'idée d'une publication, sorte de Livre d'Or, où seraient relatées les découvertes françaises en électricité fut émise, dans le courant de 1913, par notre trésorier M. Brocq; elle reçut l'approbation de votre Comité d'administration. Une Commission dite « Commission historique » fut nommée avec mission d'examiner les voies et moyens permettant d'aboutir à un résultat. Deux généreux collègues, MM. Grosselin et Labour, ont spontanément souscrit 1100 fr pour participer aux frais d'études préalables que cette publication occasionnera. Sur cette somme une dépense de 313,20 fr a déjà été engagée.

» Le montant des souscriptions pour l'amélioration du Laboratoire ne s'élève cette année qu'à 23 870 fr contre 30 270 fr en 1913.

» Nous reproduisons la liste des souscripteurs que nous ne saurions trop remercier, au nom de la Société, de leur générosité :

Liste des souscriptions reçues en 1914 pour le Laboratoire central d'Électricité.

	fr
Compagnie générale d'Électricité de Creil.....	2000
Compagnie pour la fabrication des Compteurs.....	2000
Ateliers électriques du Nord et de l'Est.....	1500
Société alsacienne de Constructions mécaniques.....	1500
Société d'Électricité de Paris.....	1500
Société parisienne pour l'Industrie des Chemins de fer électriques.....	1500
Compagnie de Constructions électriques.....	1000
Compagnie électro-mécanique.....	1000
Compagnie française Thomson-Houston.....	1000
Compagnie parisienne de Distribution d'électricité.....	1000
Tréfileries et Laminoirs du Havre.....	1000
Compagnie continentale des Compteurs.....	500
Compagnie de l'Est-Lumière.....	500
Compagnie de l'Ouest-Lumière.....	500
Geoffroy et Delore.....	500
Hillairet Huguet.....	500
Maison Bréguet.....	500
Omnium lyonnais de Chemins de fer et Tramways.....	500
Société d'Éclairage et de Force par l'électricité.....	500
Société française de l'Accumulateur Tudor.....	500
Société française des Applications industrielles.....	500
Société industrielle des Téléphones.....	500
Société française d'Incandescence par le gaz.....	300
Compagnie électrique de la Loire et du Centre.....	250
Legouëz.....	250
Richard (Jules).....	250
Association amicale des Ingénieurs-Électriciens.....	200
Compagnie électrique du Nord.....	200
Compagnie française des Câbles télégraphiques.....	200
Compagnie générale de Travaux d'éclairage et de force.....	200
Grosselin.....	200
Leclanché et C ^{ie}	200
Société l'Air liquide.....	200
Alliot et Rol.....	100
Appareillage électrique Grivolas.....	100
Compagnie française des Lampes à incandescence.....	100
A reporter.....	23250

	Report.....	23250
Compagnie des Charbons Fabius-Henrion.....		100
Dinin.....		100
Keller.....		100
L'Union électrique.....		100
Société « L'Électro-Câble » (ancienne maison Debauge).....		100
Société « Le Matériel téléphonique ».....		100
Busson.....		20
	Total.....	23870

» *Dépenses.* — Sur le montant de ces souscriptions il a été prélevé 15337,25 fr pour porter, à l'aide d'autres ressources, à 22 237,25 fr, la subvention au Laboratoire. Il en résulte que la réserve figurant, depuis plusieurs années, au passif du bilan, pour constituer un fonds affecté à l'amélioration du Laboratoire n'a pu être augmentée cette année que de 8532,75 fr en plus d'une somme de 6000 fr prélevée sur les 9000 fr de dons avec affectations spéciales, mentionnés ci-dessus, ensemble 14532,75 fr. L'importance de ce fonds atteignait en fin d'exercice 67 602,45 fr.

» Le *Bulletin* n'a occasionné en 1914 qu'une dépense de 20,138,01 fr contre 30307,49 fr en 1913 car, non seulement il n'a été possible de faire paraître, cette année, que 7 numéros au lieu de 10, mais nous rappellerons qu'en 1913 un numéro supplémentaire important avait été édité en raison du Congrès des Ingénieurs électriciens de France et d'Angleterre.

» Les appointements du personnel mobilisé ont été payés, jusqu'au 31 décembre, soit intégralement, soit de manière à parfaire les soldes militaires. Aux services généraux le personnel figure sensiblement pour la même somme en 1913 et en 1914. Les autres postes n'appellent pas de commentaires spéciaux.

» *Fonds social inaliénable.* — Il est constitué au 31 décembre 1914 par :

188 cotisations libérées.....	47 000 ^{fr} »
4 cotisations demi-libérées.....	500 »
3 suppléments de cotisations.....	240 »
Dons divers sans affectations spéciales.....	4 149,50
Ensemble.....	51 889,50

» Ce fonds inaliénable est représenté au 31 décembre 1914 par 49757,12 fr de titres des types prescrits par l'article 12 de vos statuts.

» Ces titres ont été évalués d'après les cours au 31 décembre 1913, les cours au 31 décembre 1914 résultant de circonstances trop exceptionnelles. La différence entre l'évaluation adoptée et le cours d'achat fait, comme d'usage, l'objet d'un compte d'ordre.

» II. LABORATOIRE. — L'avoir de ce compte, qui était au 1^{er} janvier 1914 de 454749,52 fr, est passé au 31 décembre 1914 à 464828,87 fr en augmentation de 10079,35 fr.

» Cette dernière somme représente la différence entre les recettes (90 413,90 fr) et les dépenses (80 334,55 fr).

» *Recettes.* — Comme on devait s'y attendre, les redevances pour essais et étalonnements, qui avaient atteint un taux satisfaisant au 31 juillet 1914 (44080,70 fr) ont été fort réduites pour les cinq derniers mois de l'année, en sorte que le total de 59340,70 fr présente une très importante moins-value de 43156,82 fr pour l'ensemble de l'exercice. Il a fallu, comme nous l'avons vu plus haut, parer à cette insuffisance de recettes par une notable augmentation de la subvention de la Société.

» *Dépenses.* — Les frais généraux d'exploitation ont heureusement diminué parallèlement au fléchissement des recettes : leur total ne s'élève qu'à 80334,55 fr, dont 10079,35 fr consacrés, dans la première partie de l'année, à des acquisitions d'instruments et de matériel. Les chiffres correspondants, en 1913, avaient été 103282,30 fr d'une part, et 6719,10 fr d'autre part.

» Les rubriques « Amortissement : Ministère du Commerce » au crédit et « Amortissement : Constructions » au débit ont cessé pour la première fois depuis vingt ans de figurer dans vos comptes. Nous vous rappelons leur origine :

» L'État avait en 1891 passé une convention avec la Société et lui avait concédé, à titre de subvention pour être exclusivement affectés au Laboratoire, les arrérages montant annuellement à 10923 fr d'une inscription de rente 3 pour 100 provenant du reliquat du capital de garantie de l'Exposition d'Électricité de 1881.

Une partie de cette rente fut aliénée, jusqu'à concurrence d'un capital de 100000 fr, pour contribuer à la réinstallation du Laboratoire à son emplacement actuel et les arrérages se trouvèrent réduits à 7903 fr, somme pour laquelle ils figurent annuellement dans vos situations.

» Comme la convention comportait une clause de remboursement éventuel de ce capital à l'État, déduction faite de 5 pour 100, soit 5000 fr, pour chacune des années écoulées depuis la date de sa constitution en 1894, il a fallu, jusqu'au et y compris le dernier exercice, pourvoir à ces amortissements.

» III. ÉCOLE. — En ce qui concerne l'École, la répercussion des événements ne pouvait affecter l'exercice 1914 que dans une mesure relativement restreinte puisque l'année scolaire se termine, en fait, au mois d'août. Les recettes qui avaient atteint 147274,17 fr en 1913, dont 133910,40 fr pour redevances d'élèves, ont été, en 1914, de 110947,79 fr, dont 100455,15 fr provenant des redevances. Il y a lieu toutefois d'attirer votre attention sur la somme de 4393,75 fr portée au passif du bilan au compte « Redevances des élèves pour 1915 ». Ce compte figurait aux deux bilans précédents respectivement pour 30450 fr et 32900 fr. La comparaison des chiffres témoigne de l'importance de la réduction de l'effectif de la promotion entrée à l'École en octobre dernier, réduction d'effectif qui ne s'explique que trop facilement.

» Les dépenses se sont élevées à 111732,10 fr, non compris une somme de 4653,85 fr employée à des acquisitions d'instruments et de matériel, ensemble 116385,95 fr. Il a été paré à l'excédent des dépenses sur les recettes par un prélèvement de 5438,16 fr sur fonds disponibles.

» L'avoir de l'École qui, au 1^{er} janvier 1914, était de 404013,32 fr figure maintenant au bilan pour 408200,21 fr; il est donc en augmentation de 4186,89 fr.

» *Radiotélégraphie.* — Le budget de la radiotélégraphie est incorporé dans celui de l'École. Il y entre, aux recettes, pour 18700 fr et aux dépenses pour 16289,95 fr. Les recettes se composent de 8700 fr de redevances payées par les élèves et de 10000 fr provenant du Ministère des Colonies.

» Les dépenses comprennent :

Frais généraux d'exploitation.....	11318,75 ^{fr}
Acquisition d'instruments et matériel.....	4971,20
Total.....	16289,95

» Les recettes de ce compte étant de 18700 fr, le solde 2410,05 fr a été reporté à l'exercice 1915.

» En résumé, les comptes de la Société se groupent de la manière suivante :

PROFITS ET PERTES (*Exercice 1914*).

	Recettes.	Dépenses.	Différences.
Services généraux.....	83 455,18 ^{fr}	75 789,04 ^{fr}	7 666,14 ^{fr}
Laboratoire.....	90 413,90	80 334,55	10 079,35
École.....	110 947,79	116 385,95	— 5 438,16
Totaux.....	284 816,87	272 509,54	12 307,33

AVOIRS NETS DES DEUX DERNIERS BILANS.

	Société.	Laboratoire.	École.	Total.
1913.....	191 321,24 ^{fr}	454 749,52 ^{fr}	404 013,32 ^{fr}	1 050 084,08 ^{fr}
1914.....	198 987,38	464 828,87	408 200,21	1 072 016,46
Excédent..	7 666,14	10 079,35	4 186,89	21 932,38

» Pour conclure, nous remarquerons que, malgré les pénibles événements actuels, qui ont eu une répercussion sur le fonctionnement de tous vos services pendant les cinq derniers mois de l'exercice, il n'a pas été nécessaire de faire appel à des ressources extraordinaires pour parer à des insuffisances de recettes ou pour donner plus d'élasticité à votre trésorerie.

» Il ne nous appartient pas de préjuger ici ce que sera l'exercice 1915, mais nous pouvons être confiants dans l'avenir et espérer que, grâce à la forte organisation de votre Société et à la prudente gestion de votre Comité d'administration, les difficultés seront surmontées.

» La Commission vous propose d'approuver les comptes tels qu'ils vous sont présentés et d'adresser vos remerciements à

votre trésorier et à ses collaborateurs pour le dévouement qu'ils apportent à la bonne gestion des finances de notre Société. »

Ce Rapport est mis aux voix et approuvé.

RAPPORT DU COMITÉ D'ADMINISTRATION.

M. le SECRÉTAIRE GÉNÉRAL INTÉRIMAIRE. — « Messieurs, les graves événements qui se déroulent depuis huit mois ne pouvaient qu'influer défavorablement sur la marche et la gestion de notre Société, durant la majeure partie de la session qui s'achève aujourd'hui : nous en avons, en effet, ressenti le contre-coup avec d'autant plus d'intensité que plus de la moitié de nos collègues a, dès les premiers jours, répondu à l'appel de la mobilisation et a dû, par conséquent, délaisser brusquement notre si attachante œuvre commune; entre autres, et avec la plupart des vice-présidents, des secrétaires de section et des membres du Comité, le très distingué Secrétaire général, âme de notre activité sociale.

» Cette subite et considérable perte de forces vives a causé une perturbation compréhensible dans nos services techniques et administratifs qui ont bien failli momentanément en être paralysés; mais, grâce à de persévérantes initiatives secondées par le concours résolu de tous ceux qui restaient au poste de confiance que vous leur avez attribué et qui ont provoqué une réaction salutaire, l'arrêt total a pu être évité et la Société n'a pas tardé à reprendre, en même temps qu'une relative liberté d'action, le cours de ses travaux dans les limites très étroites, sans doute, imposées par d'impérieuses circonstances.

» Dans la réunion de janvier dernier, M. le Président vous a fait connaître, en une vibrante et patriotique allocution, la mort de ceux de nos collègues qui déjà avaient été tués à l'ennemi et dont la funèbre mais glorieuse liste n'est malheureusement pas close; puis, ce qui avait été fait dans la mesure de nos moyens pour collaborer à l'œuvre de la Défense nationale, pour alimenter les expériences du Laboratoire, assurer la réouverture et l'enseignement de l'École dans les meilleures conditions réalisables, pour reprendre

enfin la tenue régulière de nos réunions mensuelles et la publication du *Bulletin*.

» Il semble donc inutile de revenir dans le présent Rapport sur ces points essentiels de notre gestion. Pourtant, il peut convenir d'ajouter que ce n'est pas sans avoir mûrement envisagé les difficultés et les éventualités de la situation que votre Comité a finalement établi les conditions dans lesquelles, durant cette phase critique, le fonctionnement de la Société était le plus avantageusement susceptible de s'effectuer; c'est ainsi que, notamment, il a condensé, dans un cadre prudemment restreint, les prévisions budgétaires de l'exercice 1915; de même que, à raison des empêchements qui résultent de l'état de guerre, il a reconnu la nécessité de surseoir aux élections de renouvellement annuel et, par suite, de vous proposer le maintien provisoire en fonctions des administrateurs élus par les dernières assemblées générales : dès que le retour à la vie normale le permettra, une assemblée générale sera spécialement convoquée pour compléter et parfaire en tous points les rouages de notre organisme administratif.

» D'ailleurs et pour des raisons évidentes, il serait bien difficile en ce moment de préciser notre effectif social, lequel était de 1825 membres à cette même époque de l'an dernier; mais il se produit, à cet égard, un symptôme des plus réconfortants et, aussi, d'un trop noble caractère pour ne pas vous être signalé : c'est le fait d'un certain nombre des sociétaires actuellement sur la ligne de feu où ils perdent si peu le souvenir de notre groupement que, spontanément, ils ont fait parvenir leur cotisation pour l'année courante : ceux-là nous disent bien haut, de la sorte, leur inébranlable attachement à la Société, toute la confiance qu'ils ont et que nous devons avoir dans les promesses de son avenir.

» A nous donc de « serrer les rangs », suivant une expression d'actualité, et de faire en sorte qu'à leur retour parmi nous, ces vaillants du front trouvent notre champ d'action en bon état d'entretien et prêt pour de nouvelles fécondations.

» Cependant, Messieurs, la production intellectuelle des débuts de l'exercice écoulé suffirait, à elle seule, à illustrer cette période annuelle si troublée de notre histoire : Elle est remarquable,

en effet, d'un côté, par le succès de l'excursion que nous avons organisée à l'Exposition de Lyon, en juin dernier, excursion constituant l'une des manifestations décentralisatrices que nous nous attacherons à renouveler en toute occasion propice; d'autre part, tant par la qualité technique des sujets traités dans nos réunions et dont plusieurs avaient été préparés par les Sections d'étude, que par la grande autorité des conférenciers entendus et qui, par là, se sont acquis tout particulièrement notre gratitude; commémorons celle-ci par de courtes citations :

» M. J. de Kowalski est venu de Suisse nous entretenir d'un procédé économique pour assainir les eaux potables à l'aide des rayons ultraviolets; — M. Ed. Imbs a donné une description aussi complète qu'attrayante des puissantes usines de la C. P. D. E.; — M. le lieutenant-colonel Ferrié a fait ressortir l'importance du rôle que joue l'éclateur en radiotélégraphie et en a comparé les divers modèles en usage; — un coin du voile qui cache les mystérieux phénomènes de la croissance cristalline a été soulevé par M. *Félix Robin*, lequel, depuis, est mort au champ d'honneur : nous saluons, en passant, la mémoire de ce très regretté collègue; — M. de la Gorce a fourni une importante contribution à l'étude des harmoniques; — d'intéressantes données sur les lampes dites « demi-watt » ont été définies par M. Bruder et des dispositifs particuliers de moteurs à courants alternatifs ont été décrits par M. Gratzmuller; — M. Boucherot a magistralement approfondi les causes d'accidents provenant de certaines surtensions dans les câbles souterrains et suggéré les moyens d'y remédier, sujet à propos duquel MM. A. Léauté et E.-P. Masson ont énoncé d'utiles remarques; — M. B. Szilard, appuyé par M. P. Besson, a montré les avantages que procurerait l'emploi du radium pour les pointes de paratonnerre. Puis, durant ce qu'on peut appeler la seconde moitié d'une session tragiquement scindée, M. F. Brocq a décrit un très ingénieux système semi-automatique de visée et de tir sur buts mobiles; — dans une étude précise sur les piles électriques à un seul liquide, M. H. Bellini a établi la possibilité d'éviter leur polarisation; — les courants qui se produisent dans les arbres de dynamos ont été minutieusement reconnus par M. P. Girault qui, tout à l'heure, vous exposera la suite de ses fructueuses et remar-

quables investigations; — enfin, M. Chaumat a captivé notre attention en traitant de la préparation et des curieuses propriétés électriques du bore pur qui, entre autres, présente des variations extraordinairement amples de résistance avec la température.

» Tel est le bilan, fort respectable en somme, des résultats de cet exercice auquel s'appliquent, en outre, deux Communications faites au cours des réunions de Lyon par M. Béthenod, sur les machines électriques à haute fréquence, et par M. L. Joly, sur les transformateurs statiques de fréquence.

» Tous ces travaux ont été reproduits intégralement dans notre *Bulletin mensuel* dont la valeur se rehausse de substantiels résumés des Communications techniques faites à l'étranger. Pour le motif qui, d'une façon générale, a suspendu ou ralenti le mouvement de toutes les affaires, il n'a pas été possible de faire paraître le *Bulletin* pendant les derniers mois de l'année et nous avons dû réunir en un seul numéro (juillet-décembre) la matière du deuxième semestre 1914. Mais nous traversons enfin la pénombre de cette longue éclipse, avec le ferme espoir de retrouver bientôt la pleine lumière, et nous avons l'entière conviction que le cercle de nos travaux ira désormais en s'élargissant, jusqu'à l'ère de paix victorieuse qui rendra, avec la plénitude de ses moyens, tout son bel essor à notre Société. »

Ce Rapport est approuvé.

**RAPPORT ANNUEL SUR LE LABORATOIRE CENTRAL
ET L'ÉCOLE SUPÉRIEURE D'ÉLECTRICITÉ.**

M. P. JANET. — « Messieurs, depuis mon dernier Rapport, le Laboratoire et l'École ont été cruellement frappés dans la personne de trois de leurs chefs de travaux, glorieusement tombés au champ d'honneur, Henri Bureau, Pierre Le Bœuf, Edmond Millien. Notre Président vous a rappelé en quelques mots, dans la séance de janvier dernier, la vie et la carrière, si tôt interrompue, de ces trois jeunes ingénieurs, tous trois anciens élèves de notre École, et qui nous permettaient pour l'avenir les plus belles espérances. On n'a pas oublié le beau travail de Bureau sur les isolants, qui a été publié dans notre *Bulletin*; d'autres recherches, dans lesquelles il apportait le même esprit méthodique et rigoureux étaient en cours; nous y reviendrons bientôt. Quant à Le Bœuf et Millien, ils n'avaient pu encore, en raison de leurs occupations si absorbantes à l'École, nous apporter des travaux de recherches : mais la science et l'habileté expérimentale du premier, l'esprit pratique et entreprenant du second nous assuraient pour l'avenir d'importantes contributions. Au point de vue de leur activité professionnelle, le Laboratoire et l'École doivent beaucoup à ces trois jeunes gens qui représentaient si bien l'esprit français dans ce qu'il a de meilleur : une haute valeur intellectuelle jointe au goût de l'action qui les avait orientés vers les carrières industrielles. Et dans la période de prospérité nouvelle qui s'ouvrira sans aucun doute pour nos établissements lorsque la paix victorieuse nous sera acquise, le plus bel hommage que nous puissions faire à la mémoire de ces jeunes héros sera de rappeler bien haut que cette prospérité aura été fécondée par leur sang et leur dévouement à la grande cause.

» Ces pertes, hélas ! ne sont pas les seules que nous ayons à déplorer : 34 de nos anciens élèves sont, à notre connaissance, tombés au champ d'honneur, et combien d'autres ignorons-nous

encore ? Nous ne publierons qu'ultérieurement cette glorieuse liste, tous nos renseignements n'ayant pas encore été confirmés. Mais dès maintenant, hélas ! nous savons que le livre d'or de la Société amicale de nos anciens élèves sera bien rempli.

» Mais nous devons réagir contre ces tristesses, ou plutôt les comprendre virilement ; et le devoir de ceux qui restent est de maintenir la vie des institutions qui leur sont confiées. C'est dans cet esprit que je désire vous présenter, dans sa forme habituelle mon Rapport annuel sur le fonctionnement du Laboratoire et de l'École en 1914 ⁽¹⁾.

I. — Laboratoire central d'Électricité.

» 1. PERSONNEL. — Le personnel du Laboratoire comptait 22 personnes au moment de la mobilisation ; il est réduit aujourd'hui à 6 ; avec ces moyens restreints, nous devons faire face à des travaux qui, très heureusement, deviennent de jour en jour plus nombreux, comme le montreront les chiffres indiqués plus loin.

» 2. MATÉRIEL. — La plus forte partie du crédit affecté au matériel a été employée à la mise en construction du transformateur de 200 000 V, 50 kW qui était en projet l'an dernier. La guerre a, bien entendu, interrompu cette construction.

» 3. ESSAIS. — Le nombre des essais a été de 1124 en 1914 contre 1366 en 1913. Les redevances pour essais se sont élevées à 59340,70 fr contre 102878,32 fr en 1913. La baisse de ces chiffres est évidemment due aux circonstances actuelles : il est donc intéressant d'en dégager l'influence ; c'est ce que nous avons fait dans le Tableau suivant :

(1) Nous renverrons à l'allocution prononcée par M. le Président de la Société dans la séance du 6 janvier 1915 pour quelques circonstances spéciales qu'il est inutile de reproduire ici.

1914.			
	(1). Janvier à juillet.	(2). Août à décembre.	(3). Total.
Lampes à incandescence.....	263	186	449 (1)
Compteurs.....	262	112	374 (2)
Ampèremètres.....	49	7	56
Résistivités, résistances.....	34	»	34
Voltmètres.....	29	4	33
Piles.....	23	9	32
Machines et transformateurs.....	18	»	18
Haute tension.....	18	»	18
Fers, tôles.....	17	»	17
Accumulateurs.....	17	»	17
Wattmètres.....	15	»	15
Isolements.....	7	3	10
Paratonnerres.....	7	»	7
Lampes à arc.....	8	2	7
Ondemètres.....	5	»	5
Divers.....	24	5	29
	<u>796</u>	<u>328</u>	<u>1124</u>
			1366

» Les recettes se décomposent ainsi :

Du 1 ^{er} janvier au 31 juillet 1914.....	44080,70 ^{fr}
Du 1 ^{er} août au 31 décembre 1914.....	15260,00
Total.....	<u>59340,70</u>

» Si l'on observe que le nombre d'essais ainsi que les recettes ont été à peu près nuls en août et septembre, on sera frappé de la rapidité avec laquelle a repris le service des essais à partir du mois de novembre dernier.

» Cette statistique ne comprend pas les essais photométriques effectués pour le compte de l'Association des consommateurs

(1) Essais portant sur 1400 lampes et plus de 1600 mesures photométriques.

	(1).	(2).	(3).
(2) Service de l'octroi.....	199	90	289
Chambre des Députés.....	11	11	22
Ministère des Travaux publics.....	10	6	16
Divers.....	42	5	47
			<u>374</u>

de lampes électriques, essais qui, après avoir eux aussi subi un temps d'arrêt, reprennent maintenant peu à peu : avant le 1^{er} août, il avait passé sur nos bancs photométriques environ 16000 lampes à filament de carbone et 4000 à filament métallique (contre 29000 et 6200 pour l'année entière de 1913).

» Les principaux essais exécutés par le Laboratoire en 1914 ont été les suivants :

» *a. Ministère de la Marine.* — Nous avons, comme les années précédentes, effectués les essais d'accumulateurs demandés par les constructeurs en vue de la fourniture des batteries de sous-marins. La série d'essais qui avait commencé le 17 mai 1913 s'est achevée à la fin de mai 1914. Presque immédiatement lui a succédé une nouvelle série portant sur quatre éléments. Les essais durent être interrompus faute de personnel le jour de la mobilisation. Grâce à nos efforts ils ont pu être repris au mois de novembre dernier et se sont poursuivis sans interruption conformément au programme arrêté par le *Ministère de la Marine*.

» Pour le même Ministère, nous effectuons les mesures photométriques et les épreuves de durée des échantillons prélevés sur les fournitures de lampes destinées à la flotte : nous avons ainsi essayé 488 lampes en 1914.

» *b. Ministère des Travaux publics.* — Nous avons procédé en 1914 à l'étude complète de 16 nouveaux types de compteurs soumis à l'approbation ministérielle.

» *c. Ministère des Colonies.* — Le Laboratoire a effectué 25 essais de piles destinées aux services téléphoniques des Colonies.

» *d. Administration des Postes et Télégraphes.* — Nous avons essayé 123 lampes de différents types pour les services téléphoniques de la Ville de Paris.

» *e. Sous-Secrétariat des Beaux-Arts.* — Nous avons vérifié les paratonnerres des Archives nationales, de l'Élysée, du Conservatoire de Musique, du Palais-Bourbon, du Palais de Versailles.

» Parmi les essais divers, nous signalerons en premier lieu de très importantes recherches oscillographiques effectuées par M. de

La Gorce à la demande de la Compagnie des Chemins de fer du Midi dans la région des Pyrénées. Ces recherches, qui se sont traduites par plus de 75 clichés et 2 pellicules, pris dans les circonstances les plus diverses et les plus intéressantes, avaient pour objet principal l'étude de l'influence des courants alternatifs de traction sur les réseaux téléphoniques.

» Signalons également le nombre relativement élevé des essais de T. S. F. : sur cinq étalonnements d'ondemètre signalés plus haut, il faut ajouter plusieurs mesures de condensateurs, quatre essais à la tension d'isolateurs d'antennes et l'étude d'un échantillon de fer à haute fréquence.

» Enfin je mentionnerai l'étalonnement de plusieurs compteurs à haute tension (jusqu'à 32 000 V) dont plusieurs ont été étalonnés sur place dans les usines génératrices.

» 4. TRAVAUX ET RECHERCHES. — Un grand nombre de travaux étaient en cours au moment de la mobilisation. Nous signalerons les recherches sur le rayonnement du platine, en vue de réaliser l'unité Violle, effectuées par M. F. Laporte en collaboration avec M. Parmentier; les recherches sur les étalons mercuriels de l'ohm effectuées par M. Jouaust sur les dix étalons prototypes qui nous ont été confiés par M. Benoît; les recherches de M. de la Gorce sur la détermination des harmoniques par la méthode de la résonance (ce dernier travail a fait l'objet d'une Communication à la Société).

» Enfin, nous devons une mention toute particulière à l'important travail que Bureau avait entrepris en vue de réunir des données pratiques sur l'échauffement des conducteurs dans l'eau en mouvement, entre des limites très étendues de la densité du courant électrique et de la vitesse du courant d'eau. C'est avec une profonde tristesse que nous passons chaque jour devant ses appareils encore montés dans notre salle de machines : *pendent opera interrupta*. Nous considérerons que le meilleur hommage que nous puissions rendre à la mémoire de Henri Bureau sera de mettre en ordre les nombreux documents déjà réunis, et de faire reprendre et achever des recherches dont le programme était entièrement tracé : ce travail sera, en son temps, présenté à notre Société.

» M. Jouaust, comme membre et secrétaire de la Commission scientifique de Télégraphie sans fil, a pris une part active aux recherches relatives à l'influence des conditions atmosphériques sur la transmission des signaux hertziens.

» Enfin rappelons les deux intéressantes conférences qui ont été faites devant la sixième Section, l'une par M. Jouaust sur l'état actuel de l'étude et de la théorie du magnétisme; l'autre par M. Parmentier sur la Radioactivité. Cette innovation a été fort appréciée de nos collègues.

II. — École supérieure d'Électricité.

» 1^o *Matériel*. — Outre l'acquisition d'un grand nombre d'appareils de mesure courants, nous signalerons l'acquisition définitive, pour notre section de Radiotélégraphie, d'un groupe industriel Aster de 12 kW pouvant fonctionner au pétrole. La Compagnie Aster a bien voulu nous donner l'assurance qu'elle maintiendrait toujours dans nos laboratoires de Radiotélégraphie, son modèle de moteur le plus récent et le plus perfectionné.

» 2^o *Enseignement*. — Notre collègue, M. Brunswick, qui depuis la fondation de l'École a été l'un de nos collaborateurs les plus dévoués, a dû, à notre grand regret, nous demander, pour raison de santé, de le faire suppléer pendant l'année 1914 dans ses conférences sur le calcul et la construction des machines à courant continu et la construction des machines à courants alternatifs. Nous avons fait appel pour cette suppléance à l'un de nos anciens élèves, M. Georges Petit, ingénieur des Arts et Manufactures, ingénieur en chef à la Compagnie Électro-Mécanique. Nous avons été très heureux de voir revenir parmi nous M. Georges Petit, dont l'enseignement a été fort apprécié par ses jeunes camarades.

» 3^o *Voyage d'études*. — Le voyage d'études s'est effectué du 1^{er} au 12 avril 1914, sous la direction de M. Chaumat, sous-directeur de l'École, assisté de MM. Millien et Le Bœuf. Il comprenait 47 participants; les dépenses se sont élevées à 285 fr par élève. Le programme de voyage, déjà modifié en 1913, s'est

amélioré encore en 1914 par la visite de la ligne de traction monophasée, Saint-Moritz-Tarasp. Partout l'accueil fait à notre École a été particulièrement chaleureux : notons en particulier la visite de l'usine génératrice de Morbegno (Chemins de fer de la Valteline) où l'Administration des Chemins de fer italiens avait bien voulu déléguer deux de ses ingénieurs pour diriger la visite des installations. Suivant une tradition qui nous est précieuse, M. Thury, membre d'honneur de notre Société, s'est joint à nos élèves pendant une partie de l'excursion, et leur a prodigué ses explications et ses conseils avec son affabilité coutumière. Enfin, notre excellent collègue et conférencier, M. Mazen, suivant lui aussi une tradition qui nous est précieuse, a tenu, au grand profit de nos élèves, à illustrer sur place son enseignement de la traction électrique.

» Quatre bourses avaient été mises à notre disposition par le Ministère du Commerce et deux par nos conférenciers : grâce à ces concours, nous avons pu faire participer à ce voyage si profitable neuf de nos élèves, à titre de boursiers ou de demi-boursiers.

» Nous ne saurions trop remercier tous ces dévouements : ce sont eux qui font la prospérité et le renom de notre École.

» 4^o *Promotion XX* (1913-1914). — Il a été délivré à la fin de juillet dernier 112 diplômes se répartissant ainsi :

Officiers et ingénieurs délégués par les Ministères.....	10
Ingénieurs des Arts et Métiers.....	31
Licenciés ès sciences.....	12
Élèves étrangers diplômés d'Écoles techniques supérieures.....	6
Anciens élèves de l'École Polytechnique.....	5
Ingénieurs des Arts et Manufactures.....	3
Ingénieur diplômé de l'École supérieure d'Aéronautique.....	1
Ingénieur physicien de l'École de Physique et de Chimie industrielles.....	1
Ingénieur stagiaire de première classe de l'École centrale lyonnaise.....	1
Élèves reçus au concours et divers.....	39

112

» *Promotion XXI* (1914-1915). — Les conseils de l'École et le Bureau de la Société ont longuement délibéré sur la question de savoir s'il convenait d'ouvrir l'École en 1914 malgré les circonstances exceptionnelles où nous nous trouvions. La question a été

résolue par l'affirmative : il a paru indispensable de maintenir, ne fût-ce qu'au minimum, l'activité de l'École pour la trouver prête aux devoirs importants et pressants qui lui incomberont le lendemain de la cessation des hostilités. Mais, cette décision prise, il a été convenu que le niveau ordinaire de nos études serait strictement maintenu, et que notre recrutement et la sélection de nos élèves s'opéreraient suivant le mode habituel. La promotion en cours d'étude ne comprend donc que 14 élèves (6 de plus que l'année de la fondation de l'École en 1894) et voici sa composition :

Licenciés ès sciences.....	3
Élèves étrangers diplômés d'Écoles techniques supérieures.....	2 (1)
Ingénieurs des Arts et Manufactures.....	2
Ingénieur civil des Mines.....	1
Élèves reçus au concours (sur 32 candidats).....	6
	<u>14</u>

» A ces élèves réguliers il convient d'ajouter 3 auditeurs libres, suivant en tout ou en partie notre enseignement.

» 6° *Anciens élèves.* — Le nombre total d'anciens élèves ayant passé par l'École supérieure d'Électricité (non compris la promotion actuelle) est de 1641 se décomposant comme suit :

Officiers et ingénieurs délégués par les Ministères français de la Guerre, de la Marine et du Commerce (Postes et Télégraphes).....	189
Anciens élèves des Écoles nationales d'Arts et Métiers.....	216
Licenciés ès sciences.....	213
Ingénieurs des Arts et Manufactures.....	175
Élèves étrangers diplômés d'Écoles techniques supérieures.....	151
Anciens élèves de l'École Polytechnique.....	150
Ingénieurs civils des Mines, des Constructions civiles, des Constructions navales.....	42
Anciens élèves de l'École centrale lyonnaise, de l'École municipale de Physique et Chimie.....	10
Élèves reçus au concours et divers.....	495
	<u>1641</u>

» Sur ces 1641 élèves, 1400 ont obtenu le diplôme d'ingénieur électricien de notre École.

(1) Dont un ingénieur belge de l'École des Arts et Manufactures de l'Université de Gand, admis gracieusement à suivre nos cours.

» 7^o *Société amicale des Ingénieurs sortis de l'École supérieure d'Électricité.* — Cette Société compte actuellement 660 membres environ. Nous avons signalé l'an dernier la création récente d'une Caisse de crédit d'études qui constitue une de ses œuvres les plus intéressantes. Le capital de cette caisse, qui n'en est qu'à ses débuts, est actuellement de 2673 fr dont 1050 fr sont déjà engagés en prêts d'honneur. Nous souhaitons vivement qu'après la guerre, à une époque où il y aura tant d'infortunes à soulager et de mérites à soutenir, de généreux donateurs constituent à cette fondation si utile l'important capital dont elle a besoin pour fonctionner régulièrement.

» Telle est, Messieurs, dans les circonstances graves que nous traversons, la situation des deux Établissements que vous avez fondés. Nos pensées nous portent bien loin d'eux en ce moment, vers ceux qui combattent et se dévouent pour les idées de civilisation supérieure que la France représente dans le monde : du moins, lorsqu'ils reviendront, ils trouveront le terrain qui nous était confié prêt à recevoir de nouvelles et fécondes semences pour l'avenir industriel de notre chère Patrie. »

Ce compte rendu est approuvé.

Après une courte suspension de séance, pour permettre le dépôt dans l'urne des bulletins de vote sur les propositions soumises à l'Assemblée générale, et durant que s'opère le scrutin, il est donné suite à l'ordre du jour qui appelle les Communications techniques.

SITUATION FINANCIÈRE.

COMPTES DE L'EXERCICE 1914.

I. — Services généraux.		CRÉDIT.	DÉBIT.
Cotisations libérées.....	fr 2615,00	Bulletin.....	fr 20138,04
Cotisations de l'exercice.....	33740,00	Frais d'administration.....	2112,65
Intérêts.....	3865,03	Personnel.....	10244,00
Produits du Bulletin.....	7265,15	Frais de correspondance.....	932,50
Dons d'Ouvrages divers.....	385,00	Frais de réunions.....	929,80
Participation de l'Ecole à la Subven- tion du Laboratoire.....	2000,00	Subventions diverses.....	3350,00
Dons avec affectations spéciales...	9000,00	Cotisations irrécouvrables.....	120,00
Souscriptions pour le Laboratoire...	23870,00	Profits et pertes.....	92,08
Intérêts du legs Hughes.....	1500,00	Subvention au Laboratoire.....	22237,25
» de la Fondation Joubert...	1222,00	Bibliothèque.....	527,95
» ».....	331,20	PlACEMENT au fonds social.....	2615,00
Livre d'or.....	1100,00	Bourse Hughes.....	313,20
	86893,38	Réserve :	700,00
		Bourse Hughes.....	800,00
		— Cheux.....	1222,00
		Fondation Joubert.....	331,20
		Dons avec affectations spé- ciales.....	6000,00
		Souscriptions pour le Labo- ratioire.....	8532,75
		Livre d'or.....	786,80
		Amortissement :	
		Bibliothèque.....	385,00
		Solde créditeur	fr 4523,19
			86893,38
II. — Laboratoire.			
Arrérages de la rente.....	7903,00	Frais d'opérations et essais taxés :	
Redevances pour essais et étalonne- ments.....	59340,70	Machine à vapeur, moteurs à gaz et électrique.....	fr 10938,05
Redevances des élèves et tiers...	932,95	Produits.....	2743,80
Subvention de la Société.....	22237,25	Atelier.....	186,75
		Déplacement du personnel..	fr 16159,90
		Personnel.....	49197,90

Frais d'administration :

Frais de bureau, correspondance et divers.....	1525,15
Chauffage.....	2399,55
Eau, électricité.....	698,70
Téléphone.....	371,90
Loyer, impôts, assurances.....	4995,30
Entretien des bâtiments.....	786,35
Entretien des machines et appareils.....	1229,85
Expériences et recherches.....	3397,00
Profits et pertes.....	3434,25
Acquisition d'instruments et de matériel.....	834,00
	10079,35
	^{fr} 90413,90

III. — École.

Redevances des élèves et auditeurs.....	^{fr} 100455,15
Souscriptions.....	5000,00
Don.....	100,00
Intérêts.....	3310,99
Subvention de la Ville de Paris.....	2000,00
Profits et pertes.....	81,65
Prélèvement sur fonds disponibles.....	5438,16
Radiotélégraphie :	
Redevances des élèves.....	8700,00
Subventions.....	10000,00
	18700,00
	135085,95

Personnel.....
Travaux des élèves :

Machine à vapeur, moteurs à gaz et électrique.....	3151,95
Produits.....	1727,70
Atelier.....	1548,70
Conférences, projets, examens, etc.....	2844,40
Fournitures diverses.....	897,95
Frais d'administration :	35750,00

Frais de bureau, correspondance et divers.....

Chauffage et éclairage.....	2301,90
Entretien des bâtiments.....	3065,20
Entretien des machines et appareils.....	5367,10
Impôts, assurances.....	1068,20
Participation à la subvention du Laboratoire.....	3738,30
Acquisition d'instruments et de matériel.....	2746,70
Radiotélégraphie :	2000,00
Exploitation.....	4653,85
Instruments et matériel....	11318,75
Solde reporté à l'exerc. 1915.....	4971,20
	2410,05
	18700,00

135085,95
312393,23

312393,23

BILAN AU 31 DÉCEMBRE 1914.

PASSIF.

I. — Services généraux.

ACTIF.

		fr			fr
Fonds social (valeur au 31 décembre 1913) :			Cotisations anticipées.....		70,00
50 obl. P.-L.-M. 3 %.....	20350,00		Créditeurs divers.....		1491,30
8 obl. Est 3 %.....	3233,37		Frais de publication.....		11979,36
4 obl. Ouest-Algérien 3 %..	1596,00		Bourse Hughes.....		2561,95
758 ^{re} de rente 3 %.....	21577,75		Fondation Cheux.....		2666,00
3 bons de 1000 ^{fr} . « Défense Nationale ».....	3000,00		» Joubert.....		331,20
Espèces.....	140,60	49897,72	Fonds affectés au Laboratoire.....		67602,45
Legs Hughes (valeur au 31 décembre 1913) :			Livre d'or.....		786,80
1500 ^{fr} de rente 3 %.....		42700,00			
Legs Cheux (valeur au 31 décembre 1913) :					
1222 ^{re} de rente 3 %.....		34786,25			
Fondation Joubert (valeur au 31 décembre 1913) :					
23 obl. P.-L.-M. 3 %.....	9361,00				
Espèces.....	26,28	9387,28			
Fonds disponibles (valeur au 31 décembre 1913) :					
20 obl. Nord 3 %.....	8320,00				
30 obl. État 4 %.....	15090,00				
40 obl. Orléans 4 %.....	19880,00	43290,00			
Caisse et banquier.....		47011,69			
Cotisations à toucher.....		5890,00			
Débiteurs divers.....		10099,15			
Bibliothèque.....		22924,35			
Mobilier.....		1900,00			
Compte d'ordre.....		18590,00			
					286476,44

II. — Laboratoire.

Bibliothèque.....	fr 2975,40	Créditeurs divers.....	fr 20341,44
Constructions.....	217400,43		
Instruments et matériel.....	244433,04		
Caisse.....	628,89		
Débiteurs divers.....	19072,55		
Cautionnement.....	640,00		
	485170,31		

III. — École.

Instruments et matériel.....	fr 229479,80	Amortissement de l'em- prunt.....	fr 599,16
Constructions.....	92961,70	Créditeurs divers.....	7719,15
Fonds de réserve (valeur au 31 décembre 1913) :		Redevances des élèves pour 1915.....	4393,75
625 ^{re} de rente 3 %.....	17791,60	Radiotélégraphie.....	19108,00
46 obl. Orléans 3 %.....	19231,00		fr 31820,36
10 obl. Orléans 4 %.....	4970,00		139650,86
12 obl. Nord 3 %.....	4992,00		
10 obl. État 4 %.....	5030,00		
Fonds disponibles (valeur au 31 décembre 1913) :			
39 ^{re} de rente 3 %.....	1110,20		
68 obl. Nord 3 %.....	28288,00		
18 obl. Orléans 3 %.....	7533,00		
20 obl. Orléans 4 %.....	9940,00		
Caisse et banquier.....	46871,20		
Débiteurs divers.....	1824,17		
Cautionnement.....	9175,00	Services généraux.....	fr 198987,38
Compte d'ordre.....	143,35	Laboratoire.....	464828,87
	7530,75	École.....	408200,21
	440020,57		fr 1072016,46
	1211667,32		1211667,32

Avoir net au 31 décembre 1914 :

SUR LES COURANTS DANS LES ARBRES DE DYNAMOS.

DEUXIÈME PARTIE.

COURANTS ALTERNATIFS.

M. PAUL GIRAULT. — « Nous rappelons que la production indésirée de courants dans les arbres et paliers de dynamos a été étudiée par plusieurs auteurs autrichiens : Punga et Hess ⁽¹⁾, Fleischmann ⁽²⁾ et Adler ⁽³⁾. M. L. Berger ⁽⁴⁾ et M. E. G. Merriek ⁽⁵⁾ ont résumé ces études.

» Ces différents travaux envisagent uniquement la production de courants *alternatifs* dans les circuits électriques arbre-palier-bâti. La machine type qui s'y trouve toujours envisagée tout d'abord est l'alternateur ordinaire à pôles saillants et mobiles, et dont la carcasse fixe d'induit est divisée en un certain nombre de parties; les joints d'assemblage de ces segments constituent des dissymétries types dans la réluctance du noyau d'induit.

» Dans ce qui suit, nous voulons montrer que le mode de représentation adopté par Fleischmann et Adler, pour la répartition des flux dans un tel alternateur, est en toute rigueur inacceptable; et nous exposerons une autre manière de voir, laquelle conduit en particulier au mode de calcul employé par Punga et Hess sans démonstration rigoureuse pour un alternateur à quatre pôles.

» Nous reprenons ici le cas type de l'alternateur ordinaire dont le système inducteur à pôles saillants, excité par courant continu, tourne autour de l'axe.

» M. L. Berger résume ainsi le point de base des auteurs autrichiens Fleischmann et Adler :

« On constate (*fig. 1*) que chaque flux devrait se diviser en deux

⁽¹⁾ PUNGA F. et D^r W. HESS, *Elektrotechnik und Maschinenbau*, 11 août 1907.

⁽²⁾ D^r L. FLEISCHMANN, *Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen*, 23 juin 1909.

⁽³⁾ LEONHARD ADLER, *Elektrotechnik und Maschinenbau*, 20 février 1910.

⁽⁴⁾ *Lumière électrique*, 27 août 1910.

⁽⁵⁾ *General electric Review*, octobre 1914.

» portions égales Φ_1 et Φ_2 dans le stator, mais, pour cela, il faut
» que les réluctances des deux circuits soient identiques.

» Or, ces réluctances peuvent varier soit par défaut de construction ou différence de perméabilité du métal, ou encore par la
» construction même (joints, etc.).

» Cette inégalité de réluctance occasionne une différence entre
» Φ_1 et Φ_2 , de sorte que $\Phi_2 = \Phi_1 - x$. Si l'on imagine alors que ces

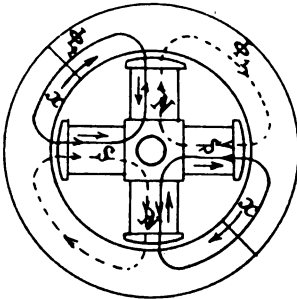


Fig. 1.

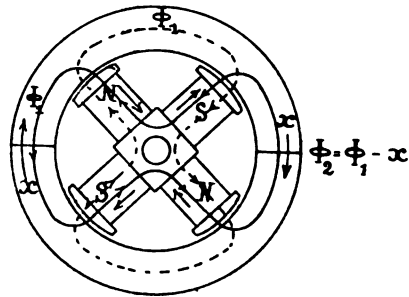


Fig. 2.

» flux Φ_1 et Φ_2 se ferment comme l'indique la figure 2, ce qui ne
» change rien au flux total, on voit clairement que chacun de ces
» champs entourant l'arbre peut créer le long de cet arbre une force
» électromotrice, s'il est pulsatoire. Or on voit (fig. 2) que le champ
» le plus faible $\Phi_1 - x$, tracé en traits gras, tourne autour de l'arbre
» dans le sens contraire des aiguilles d'une montre; après une rota-
» tion du rotor, égale à un pôle, le même champ $\Phi_1 - x$ sera le
» champ tracé en pointillé, lequel tourne autour de l'arbre dans le
» sens des aiguilles d'une montre. Il y a donc eu une pulsation
» complète du champ d'intensité x et à la fréquence de la dynamo,
» pulsation qui aura créé une force électromotrice le long de
» l'arbre. »

» Cette indication que le passage de la représentation de la
figure 1 à celle de la figure 2 ne change rien au flux total est inad-
missible. En effet, la figure 1 représente quatre flux qui se ferment
sans qu'aucun de leurs filets traverse un nombre impair de fois
le circuit arbre-palier-bâti et qui, par suite, ne peuvent induire
aucune force électromotrice dans ce circuit; tandis que la figure 2
représente des flux qui traversent une seule fois le circuit considéré,

de telle sorte que leur variation y induit des forces électromotrices. Les deux représentations sont donc totalement différentes.

» En toute rigueur, nous croyons que le Dr Fleischmann, suivi par l'ingénieur Adler, abandonne la représentation de la figure 1 et adopte au contraire celle de la figure 2, simplement parce que cette dernière lui procure un flux différentiel alternatif entourant l'arbre, ce qui permet ainsi d'expliquer le phénomène observé, tandis que la première ne le lui procure pas. Mais il est bien évident que cette simple satisfaction d'un désir ne saurait suffire à rendre exact le mode de représentation adopté.

» Le circuit magnétique d'un alternateur multipolaire du type considéré constitue un véritable *réseau magnétique*; la simple application des lois de Kirchhoff à un tel réseau conduit à un nouveau mode de représentation pour la répartition des flux autour de l'arbre.

» Pour fixer les idées, nous examinerons tout d'abord les cas très simples d'alternateurs à quatre et six pôles avec dissymétries dues aux joints, disposées diamétralement et identiques entre elles.

» 1. *Alternateur à quatre pôles (la dissymétrie due aux joints s'y*

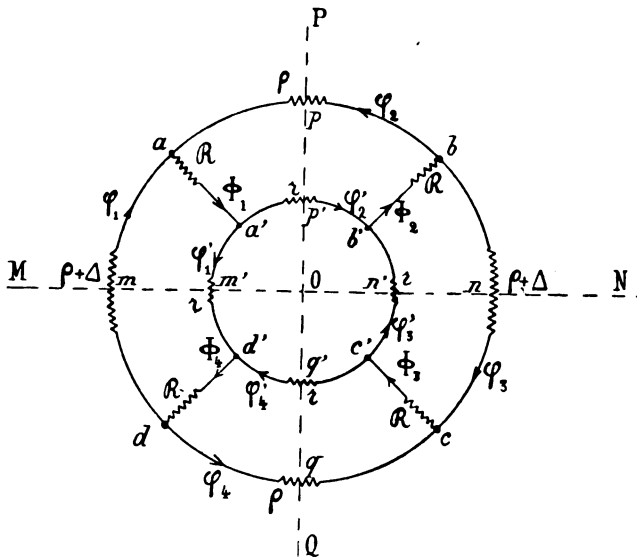


Fig. 3.

reproduit tous les deux pôles). — Dans la figure 3, le cercle extérieur *abcd* représente la partie extérieure du réseau magnétique et

correspond au noyau d'induit; le cercle intérieur $a'b'c'd'a'$ correspond au moyeu magnétique qui, entourant l'arbre, réunit les différentes masses polaires; les segments radiaux aa' , bb' , cc' , dd' correspondent chacun à une masse polaire et à l'entrefer correspondant et aussi, approximativement, à la denture d'induit en regard.

» L'élément tournant est constitué par le cercle intérieur $a'b'c'd'a'$ et ses saillies radiales $a'a$, $b'b$, $c'c$, $d'd'$. Le cercle extérieur $abcd$ est immobile, et nous le supposons coupé par des joints (de réluctance individuelle Δ) en m et n , suivant un plan horizontal dont la trace MN coupe le cercle intérieur en m' et n' ⁽¹⁾.

» Nous dénommons :

φ , les réluctances égales de chacune des branches extérieures sans joint ab et cd ;

$\varphi + \Delta$, les réluctances égales des branches extérieures bc et da pourvues de joints;

r , les réluctances supposées égales de chacune des branches intérieures $a'b'$, $b'c'$, $c'd'$, $d'a'$;

$\mathcal{A}$, les réluctances supposées égales de chacune des branches radiales aa' , bb' , cc' , dd' ;

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$, les flux dans chacune des branches extérieures;

$\varphi'_1, \varphi'_2, \varphi'_3, \varphi'_4$, les flux respectifs correspondants dans chacune des branches intérieures;

$\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$, les flux dans les branches radiales, tous ces flux étant comptés positivement dans le sens des flèches.

» Faisons tout d'abord la remarque suivante : *lorsque les pôles (branches radiales) sont en face des joints*, l'influence de ces joints ne se fait pas sentir puisqu'ils ne sont traversés par aucun flux; *les flux dans les branches extérieures sont alors égaux entre eux*.

» Au fur et à mesure que, par suite de la rotation, on s'éloigne de

(1) Nous supposons l'inducteur mobile; mais il serait facile de vérifier que ce qui suit serait encore vrai dans le cas où l'induit serait tournant et l'inducteur mobile; il suffirait de représenter alors le cercle $a'b'c'd'a'$ à l'extérieur du cercle $abcd$, et ce cercle $a'b'c'd'a'$ représenterait alors la couronne magnétique; les joints d'induit seraient par exemple les joints entre segments de tôles d'induit, à l'endroit desquels la section de tôle est en général réduite à moitié.

cette position, les joints interviennent et c'est pour les positions telles que celle représentée dans la figure 3 (où chaque point est équidistant de deux pôles consécutifs) que leur action perturbatrice est la plus forte. Cherchons la répartition des flux pour cette dernière position.

» Chacun des quatre pôles possède une même force magnéto-motrice $\mathcal{F}$; chacun d'eux débite, d'autre part, sur deux branches intérieures d'égale réluctance r et sur deux branches extérieures qui ont toujours, l'une une réluctance ρ , l'autre une réluctance $\rho + \Delta$; les réluctances $\mathcal{R}$ de chaque branche radiale étant en outre égales entre elles, les quatre pôles sont identiques entre eux (sauf alternativité de l'orientation de leurs deux branches extérieures). Il en résulte aussitôt que :

$$(1) \quad \Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = \Phi_4;$$

$$(2) \quad \varphi'_1 = \varphi'_2 = \varphi'_3 = \varphi'_4;$$

$$(3) \quad \varphi_1 = \varphi_3;$$

$$(4) \quad \varphi_2 = \varphi_4.$$

» Par suite de la présence du joint, on a évidemment

$$(5) \quad \varphi_1 < \varphi_2 \quad (1);$$

et l'on a, d'après la première loi de Kirchhoff, aux nœuds a et a' ,

$$(6) \quad \varphi_1 + \varphi_2 = \varphi'_1 + \varphi'_2 = 2\varphi'_1;$$

il en résulte

$$(7) \quad \varphi_1 < \varphi'_1.$$

Soit donc

$$(8) \quad \varphi'_1 = \varphi_1 + \alpha,$$

α étant l'excédent de φ'_1 sur φ_1 . L'équation (6) peut s'écrire

$$\varphi'_2 - \varphi_2 = \varphi_1 - \varphi'_1$$

ou

$$(9) \quad \varphi'_2 - \varphi_2 = -\alpha.$$

(1) Cette inégalité résultera d'ailleurs très explicitement de l'équation (16) et des considérations qui la précèdent.

» On a ainsi, en appliquant de proche en proche les lois de Kirchhoff aux nœuds bb' , cc' , dd' ,

$$(10) \quad \begin{cases} \varphi'_1 = \varphi_1 + \alpha, \\ \varphi'_2 = \varphi_2 - \alpha, \\ \varphi'_3 = \varphi_3 + \alpha, \\ \varphi'_4 = \varphi_4 - \alpha. \end{cases}$$

» Comme, d'autre part,

$$(11) \quad \begin{cases} \Phi_1 = \varphi_1 + \varphi_2, \\ \Phi_2 = \varphi_2 + \varphi_3, \\ \Phi_3 = \varphi_3 + \varphi_4, \\ \Phi_4 = \varphi_4 + \varphi_1. \end{cases}$$

nous pouvons aussitôt, en nous appuyant sur les équations (10) et (11), passer à la représentation des flux donnée par la figure 4.

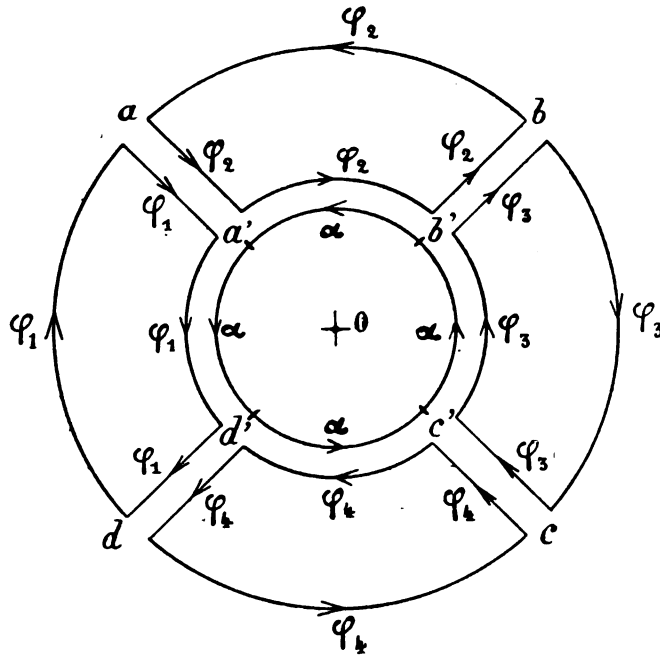


Fig. 4.

» Une première *maille* $aa'd'd$ comportera :

- » 1° Un flux φ_1 pour la branche da ;
- » 2° Un flux φ_1 emprunté à Φ_1 [auquel il reste, d'après (11), un résidu φ_2] pour la branche aa' ;

» 3^o Un flux φ_1 , emprunté à φ'_1 pour la branche $a'd'$; mais il y a lieu, d'après (10), pour compléter φ'_1 , d'ajouter un excédent $+\alpha$ disposé suivant un arc de cercle parallèle à $a'd'$;

» 4^o Un flux φ_1 , emprunté à Φ_1 [auquel il reste, d'après (11), un résidu φ_1] pour la branche $d'd$.

» La maille à flux variable $aa'd'd$ se trouve ainsi remplacée par une maille à flux constant φ_1 , qui n'embrasse pas l'arbre, et par un tronçon d'excédent de flux $+\alpha$, de même sens que l'ancien flux φ'_1 et disposé en quart de cercle parallèlement à $a'd'$. Il reste en outre deux résidus φ_2 et φ_3 , que nous utiliserons pour les mailles adjacentes.

» Passant à la seconde maille à flux variable $abb'a'$, nous la remplacerons de même (1) par une maille à flux constant φ_2 qui n'embrasse pas l'arbre et par un tronçon d'excédent de flux $-\alpha$ provenant de l'ancien flux φ'_2 et compté positivement dans le même sens que lui, c'est-à-dire en sens inverse de φ'_1 ; cet excédent sera donc aussi représenté par un tronçon d'excédent de flux $+\alpha$, de même sens que φ'_1 , et par suite de même sens que le premier excédent; il sera disposé en quart de cercle parallèlement à $b'a'$, complétant ainsi un demi-cercle avec le premier tronçon.

» En continuant ainsi, notre réseau primitif se trouve finalement remplacé par quatre mailles dont les flux respectifs $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$, constants sur tout leur parcours, c'est-à-dire strictement fermés, se ferment sans entourer l'arbre, et par un flux circulaire de valeur $+\alpha$ qui entoure l'arbre en traversant une seule fois le circuit arbre-palier-bâti. Ce flux est de même sens que le flux primitif intérieur φ'_1 correspondant à la position en regard d'un joint; le sens de ce flux circulaire s'inverse donc chaque fois que la partie mobile tourne d'un intervalle polaire; sa périodicité est donc la même que celle de la machine.

» Cherchons à évaluer les différents flux :

» Dans la position des pôles correspondant à la figure 3, les points d et b , distants entre eux de deux pôles (comme les dissymétries), sont équipotentiels magnétiques. En effet, il résulte de

(1) Dans cette transformation, nous avons occasion entre autres d'utiliser le résidu φ_2 du flux Φ_1 qui nous avait été laissé par la transformation de la première maille.

la répétition du système tous les deux pôles, que

$$(12) \quad \begin{cases} \varphi_1 = \varphi_3, & \varphi_2 = \varphi_4; \\ \varphi'_1 = \varphi'_3, & \varphi'_2 = \varphi'_4; \\ \Phi_1 = \Phi_3, & \Phi_2 = \Phi_4; \end{cases}$$

et l'application de la seconde loi de Kirchhoff donne

$$(\rho + \Delta)\varphi_1 - \rho\varphi_2 + (\rho + \Delta)\varphi_3 - \rho\varphi_4 = 0$$

ou, d'après (12),

$$(13) \quad (\rho + \Delta)\varphi_1 - \rho\varphi_2 = 0,$$

ce qui veut bien dire, en suivant la portion de circuit *dab*, que les points *d* et *b* sont équipotentiels.

» On trouve de même, en suivant *d'a'b'*,

$$(14) \quad r\varphi'_1 - r\varphi'_2 = 0 \quad (1),$$

ou

$$(15) \quad \varphi'_1 - \varphi'_2 = 0.$$

» Remplaçons en (15) φ'_1 et φ'_2 par leurs valeurs tirées de (10); il vient

$$\varphi_1 - \varphi_2 = -2\alpha$$

qui, porté en (13), nous donne

$$\Delta\varphi_1 = 2\alpha\rho;$$

d'où

$$(16) \quad \alpha = \varphi_1 \frac{\Delta}{2\rho}.$$

» En appliquant la seconde loi de Kirchhoff à la demi-maille

(1) Si l'on mène (fig. 3) le diamètre MN passant par le milieu des joints et le diamètre PQ perpendiculaire au précédent, on verrait de même que les points *m, p, n, q, m', p', n', q'* sont tous équipotentiels; en effet, pour deux points tels que *m* et *m'* appartenant à une même maille, que l'on suive le trajet *maa'm'* ou le trajet *m'd'dm*, on rencontre d'après (12) les mêmes flux accompagnés des mêmes réluctances et des mêmes forces magnétomotrices; entre ces deux points, les forces magnétomotrices sont donc exactement compensées par les chutes de potentiel, quel que soit le sens dans lequel on aille de *m* à *m'*; ces deux points sont donc équipotentiels entre eux.

L'équation (13) divisée par 2 exprime que deux points tels que *m* et *p*, ou *p* et *n*, etc. sont équipotentiels entre eux; de même, l'équation (14) divisée par 2 exprime que deux points tels que *m'* et *p'*, ou *p'* et *n'*, etc. le sont aussi entre eux.

$ma'a'm'$, on obtient

$$(17) \quad \frac{\rho + \Delta}{2} \varphi_1 + \mathcal{R}(\varphi_1 + \varphi_2) + \frac{r}{2}(\varphi_1 + \alpha) = \mathcal{F},$$

$\mathcal{F}$ désignant la force magnétomotrice par pôle.

» Or, de l'équation (13), nous tirons

$$(18) \quad \varphi_2 = \varphi_1 \left(1 + \frac{\Delta}{\rho} \right),$$

valeur qui portée en (17) donne :

$$(19) \quad \left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 = \frac{\mathcal{F}}{\frac{\rho}{2} + 2\mathcal{R} + \frac{r}{2} + \frac{\Delta}{2} \left(1 + \frac{2\mathcal{R}}{\rho} + \frac{r}{2\rho} \right)}; \\ \text{d'où} \\ \alpha = \frac{\mathcal{F}}{\frac{2\rho}{\Delta} \left(\frac{\rho}{2} + 2\mathcal{R} + \frac{r}{2} \right) + \rho \left(1 + \frac{2\mathcal{R}}{\rho} + \frac{r}{2\rho} \right)}. \end{array} \right.$$

» On vérifie que la valeur de l'amplitude α du flux circulaire alternatif entourant l'arbre est nulle pour $\Delta = 0$; en ce qui concerne φ_1 , les trois premiers termes du dénominateur représentent les réluctances normales sans dissymétrie, celle-ci étant caractérisée par le quatrième terme en $\frac{\Delta}{2}$.

» Les équations (16 et (18) donnent

$$(20) \quad \alpha = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2},$$

ce qui légitime le mode de calcul employé par Punga et Hess pour l'alternateur à quatre pôles et deux joints : ils tracent pour les deux tronçons ab et ad les caractéristiques des flux φ_2 et φ_1 , dans ces tronçons en fonction des ampères-tours relatifs au noyau d'induit, prennent pour chaque valeur des ampères-tours la valeur de α résultant de (20), et calculent la force électromotrice efficace e dans le circuit arbre-palier-bâti par la formule

$$(21) \quad e = 4,4 f \alpha \cdot 10^{-8} \text{ volts,}$$

où f désigne la fréquence de l'alternateur.

» *Remarques.* — I. Nous pouvons remplacer les équations (10) et (11) par les suivantes :

$$\begin{aligned}
 (10)_a \quad & \left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 = \varphi'_1 - \alpha, \\ \varphi_2 = \varphi'_2 + \alpha, \\ \varphi_3 = \varphi'_3 - \alpha, \\ \varphi_4 = \varphi'_4 + \alpha. \end{array} \right. \\
 (11)_a \quad & \left\{ \begin{array}{l} \Phi_1 = \varphi'_1 + \varphi'_2, \\ \Phi_2 = \varphi'_2 + \varphi'_3, \\ \Phi_3 = \varphi'_3 + \varphi'_4, \\ \Phi_4 = \varphi'_4 + \varphi'_1. \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

» En partant de la figure 3 et en raisonnant comme ci-dessus, nous obtenons la représentation de la figure 5, équivalente à celle de la figure 4.

» Le réseau primitif est remplacé par quatre mailles dont les flux respectifs $\varphi'_1, \varphi'_2, \varphi'_3, \varphi'_4$, constants sur tout leur parcours, se ferment sans entourer l'arbre, et par un flux circulaire entourant l'arbre et qui a même valeur α et même sens que le flux α de la figure 4; mais il est extérieur au réseau au lieu de lui être intérieur.

» Les représentations des figures 4 et 5 sont donc bien équivalentes.

» II. Nous pouvons encore imaginer un troisième mode représentatif de notre réseau de flux à quatre mailles, celui de la figure 6; ce mode participe à la fois des deux précédents et résulte immédiatement des équations (10) et (11) modifiées comme suit :

$$\begin{aligned}
 (10)_b \quad & \left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 = \varphi'_1 - \alpha, \\ \varphi'_2 = \varphi_2 - \alpha, \\ \varphi_3 = \varphi'_3 - \alpha, \\ \varphi'_4 = \varphi_4 - \alpha; \end{array} \right. \\
 (11)_b \quad & \left\{ \begin{array}{l} \Phi_1 = \varphi'_1 + \varphi_2 - \alpha, \\ \Phi_2 = \varphi_2 + \varphi'_3 - \alpha, \\ \Phi_3 = \varphi'_3 + \varphi_4 - \alpha, \\ \Phi_4 = \varphi_4 + \varphi'_1 - \alpha. \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

» III. Un quatrième mode de représentation (dérivant de celui

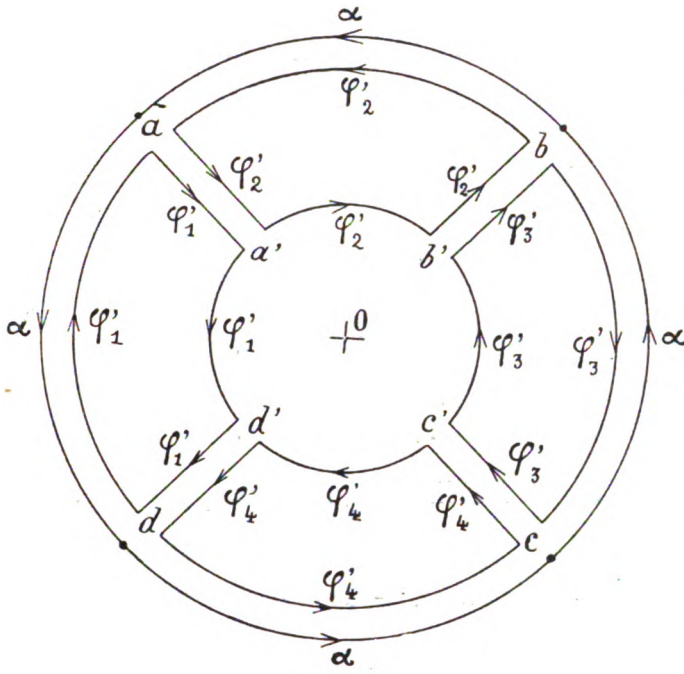


Fig. 5.

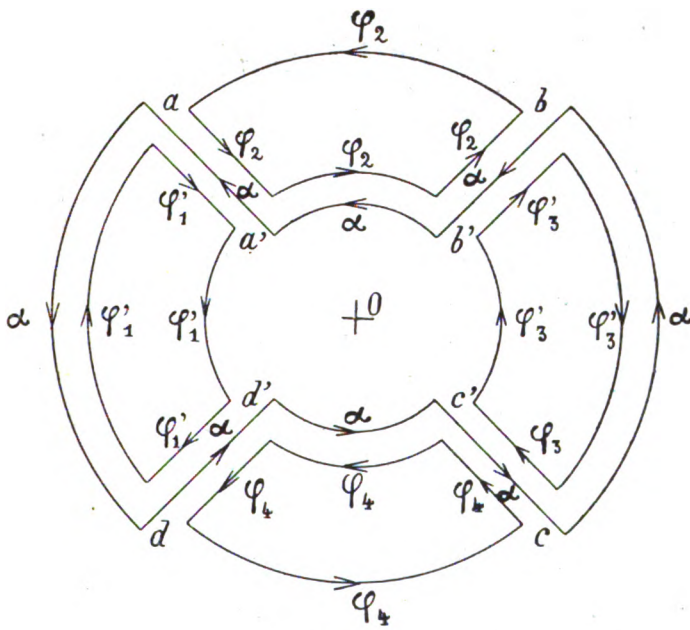


Fig. 6.

de la figure 6 comme le mode de la figure 5 dérive de celui de la figure 4) résulte de la modification suivante des équations (10) et (11) :

$$(10)_c \quad \left\{ \begin{array}{l} \varphi'_1 = \varphi_1 + \alpha, \\ \varphi_2 = \varphi'_2 + \alpha, \\ \varphi'_3 = \varphi_3 + \alpha, \\ \varphi_4 = \varphi'_4 + \alpha; \end{array} \right.$$

$$(11)_c \quad \left\{ \begin{array}{l} \Phi_1 = \varphi_1 + \varphi'_2 + \alpha, \\ \Phi_2 = \varphi'_2 + \varphi_3 + \alpha, \\ \Phi_3 = \varphi_3 + \varphi'_4 + \alpha, \\ \Phi_4 = \varphi'_4 + \varphi_1 + \alpha. \end{array} \right.$$

» Il serait facile d'établir la figure correspondante.

» 2. *Alternateur à six pôles (la dissymétrie due aux joints se reproduit tous les trois pôles).* — Ce cas est représenté figure 7 avec

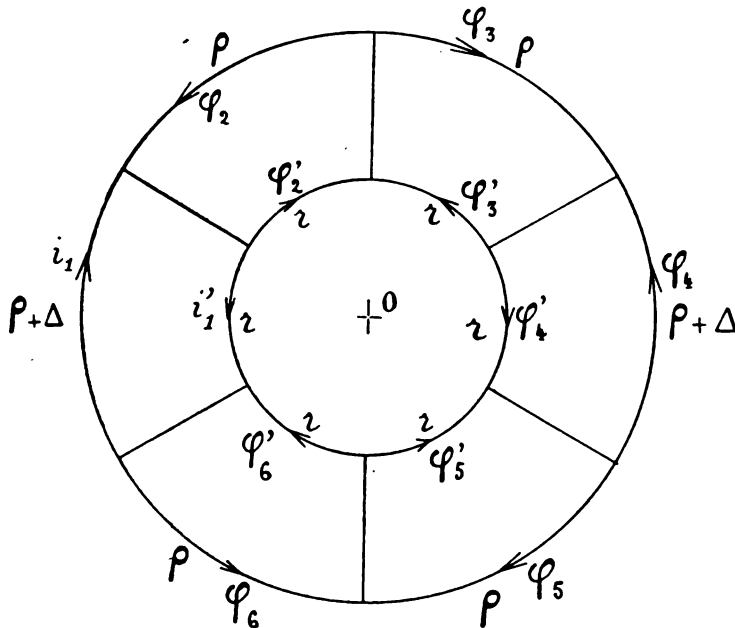


Fig. 7 ⁽¹⁾.

des notations analogues à celles de la figure 3 et pour une position relative identique des joints d'induit, par rapport à l'inducteur.

(¹) *Errata* à la figure 7. — Au lieu de i_1 et de i'_1 , lire respectivement φ_1 et φ'_1 .

» Soit encore α l'excédent inconnu de φ'_1 sur φ_1 . La première loi de Kirchhoff nous donnera, comme en (10),

$$(22) \quad \left\{ \begin{array}{l} \varphi'_1 = \varphi_1 + \alpha, \\ \varphi'_2 = \varphi_2 - \alpha, \\ \varphi'_3 = \varphi_3 + \alpha, \\ \varphi'_4 = \varphi_4 - \alpha. \end{array} \right.$$

» Or, il est bien évident, par impossibilité de privilège, que le système des flux φ doit se reproduire, à l'orientation près de ces flux, chaque fois que la dissymétrie due aux joints se reproduit; c'est-à-dire que l'on a, en valeur absolue,

$$\varphi_4 = \varphi_1,$$

$$\varphi'_4 = \varphi'_1,$$

ce qui exige que

$$(23) \quad \alpha = 0,$$

pour être compatible avec les équations (22).

» *Il n'y a donc pas, dans ce cas, de flux entourant l'arbre; le circuit « arbre-palier-bâti » n'est le siège d'aucune force électromotrice; et comme*

$$\varphi'_1 = \varphi_1,$$

$$\varphi'_2 = \varphi_2,$$

$$\varphi'_3 = \varphi_3,$$

$$\dots \dots \dots$$

chaque élément de flux intérieur est égal à l'élément de flux extérieur correspondant.

» *Répétition de la dissymétrie due aux joints après un nombre impair de pôles.* — Le résultat précédent s'étend immédiatement à un alternateur ayant un nombre quelconque de pôles et dans lequel la dissymétrie due aux joints se répète régulièrement après un nombre impair, $2k + 1$, de pôles ⁽¹⁾.

» En effet, si nous prolongeons dans ce cas le système des équations (22), nous constatons que l'on a successivement $+\alpha$ et $-\alpha$

(¹) k est un nombre entier quelconque.

au second membre et l'on obtient

$$(24) \quad \begin{cases} \varphi'_1 = \varphi_1 + \alpha, \\ \varphi'_{2k+2} = \varphi_{2k+2} - \alpha. \end{cases}$$

» D'autre part, la répétition du joint entraîne (par impossibilité de privilège de φ_1 sur φ_{2k+2}) ⁽¹⁾

$$(25) \quad \begin{cases} \varphi_1 = \varphi_{2k+2}; \\ \text{et aussi} \\ \varphi'_1 = \varphi'_{2k+2}. \end{cases}$$

» De (24) et (25) on tire

$$\alpha = 0,$$

c'est-à-dire qu'il n'y a pas de flux entourant l'arbre, et chaque élément de flux intérieur φ' est égal à l'élément de flux extérieur φ correspondant ⁽²⁾.

» Il n'y a donc à envisager ici, au sujet de la production de flux actif entourant l'arbre, que le cas ou la dissymétrie due aux joints se reproduit après un nombre pair $2k$ de pôles, k désignant un nombre entier quelconque.

» CAS GÉNÉRAL UNIQUE. — *La dissymétrie due aux joints d'induit se reproduit régulièrement après un nombre pair $2k$ de pôles.*

» La production du flux *alternatif* circulaire actif α entourant l'arbre ne peut être causée par la présence de joints sur la carcasse ou le moyeu du système inducteur, puisque les flux affectés par cette présence seule ne le seraient que d'une façon constante et ne changeraient pas de valeur lors d'un déplacement relatif de l'inducteur et de l'induit l'un par rapport à l'autre. Seuls, les *joints d'induit* peuvent produire un flux circulaire *alternatif* actif puisque par la rotation du rotor ils sont traversés en des sens alternativement contraires par les flux sortant des pôles inducteurs.

⁽¹⁾ Il n'y a aucune raison pour que l'un de ces deux flux soit supérieur à l'autre.

⁽²⁾ Ce cas est en particulier celui des alternateurs à 2, 6, 10, ... pôles avec deux joints d'induit diamétraux et identiques.

» Cette remarque est vraie quel que soit celui des deux organes, inducteur ou induit, qui soit fixe ou tournant.

» Pour montrer que nous ne supposons pas l'un des organes mobile plutôt que l'autre, nous redresserons la disposition circulaire des schémas précédents et la remplacerons par la disposition linéaire correspondante.

» Soit donc (fig. 8) un réseau magnétique d'alternateur syn-

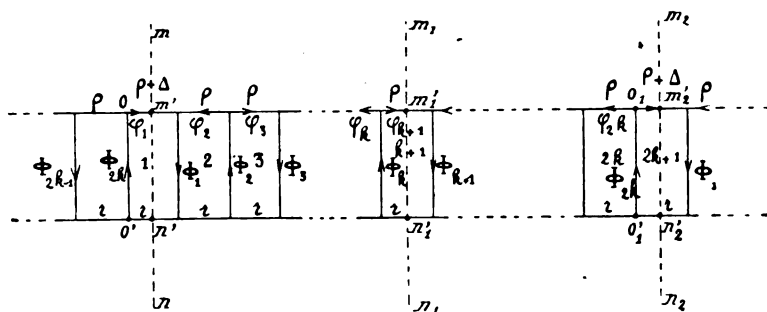


Fig. 8. — La figure suppose k pair. Elle serait inchangée pour k impair, sauf en ce qui concerne les sens des flèches $\varphi_1, \varphi_{k+1}, \Phi_k, \Phi_{k+1}$, lesquels seraient tous inversés.

chrone se reproduisant tous les $2k$ pôles. Les mailles consécutives présentant une dissymétrie Δ de réluctance due à un joint sont les mailles 1 et $2k + 1$.

» En employant des notations analogues aux précédentes, nous avons

$$(26) \quad \begin{cases} \varphi'_1 = \varphi_1 + \alpha, \\ \varphi'_2 = \varphi_2 - \alpha, \\ \dots\dots\dots, \\ \varphi'_{2k} = \varphi_{2k} - \alpha; \end{cases}$$

α désigne toujours l'excédent de φ'_1 sur φ_1 .

» Les points O' et O'_1 étant équipotentiels magnétiques, nous obtenons, en allant de l'un de ces points à l'autre,

$$(27) \quad \left\{ \begin{array}{l} r\varphi'_1 - r\varphi'_2 + r\varphi'_3 - r\varphi'_4 - \dots - r\varphi'_{2k} = 0, \\ \text{ou} \\ \varphi_1 - \varphi'_2 + \varphi'_3 - \varphi'_4 + \dots - \varphi'_{2k} = 0. \end{array} \right.$$

» Les points O et O_1 étant également équipotentiels magnétiques,

nous obtenons de même

$$(28) \quad (\rho + \Delta)\varphi_1 - \rho\varphi_2 + \rho\varphi_3 - \rho\varphi_4 + \dots - \rho\varphi_{2k} = 0$$

» Des équations (26) et (27) nous déduisons

$$(29) \quad \varphi_1 - \varphi_2 + \varphi_3 - \varphi_4 + \dots - \varphi_{2k} = -2k\alpha;$$

et cette valeur portée en (28) nous donne

$$\Delta\varphi_1 - 2k\rho\alpha = 0;$$

d'où

$$(30) \quad \alpha = \frac{\Delta}{2k\rho} \varphi_1.$$

» Il est évident que la valeur du flux φ_1 est inférieure à celle $(\varphi_1)_n$ qu'il aurait en l'absence de tout joint :

$$\varphi_1 < (\varphi_1)_n \quad (1);$$

il en résulte

$$(31) \quad \alpha < \frac{\Delta}{2k\rho} (\varphi_1)_n.$$

» Ceci nous donne une limite supérieure pour la valeur du flux actif α .

» *Décomposition du réseau de flux.* — On vérifie aisément, par extension de ce que nous avons montré pour l'alternateur à 4 pôles, qu'on peut obtenir quatre décompositions différentes, mais équivalentes entre elles, des flux d'un réseau multipolaire en une série de circuits magnétiques strictement fermés; chacune de ces décompositions présente une série de flux se fermant sans traverser un nombre impair de fois le circuit « arbre-palier-bâti » et qui sont par conséquent inactifs, et un flux actif α entourant l'arbre.

» Ces quatre modes de décomposition se déduisent de quatre paires de groupes d'équations que nous pouvons écrire immédiatement :

$$(1) \quad (\varphi_1)_n = \frac{2\mathcal{F}}{\rho + 4\mathcal{R} + r}.$$

» *Premier mode.* — Reprenons les équations (26) :

$$(32) \quad \left\{ \begin{array}{l} \varphi'_1 = \varphi_1 + \alpha, \\ \varphi'_2 = \varphi_2 - \alpha, \\ \varphi'_3 = \varphi_3 + \alpha, \\ \varphi'_4 = \varphi_4 - \alpha, \\ \dots\dots\dots, \\ \varphi'_{2k} = \varphi_{2k} - \alpha. \end{array} \right.$$

» D'autre part :

$$(33) \quad \left\{ \begin{array}{l} \Phi_1 = \varphi_1 + \varphi_2, \\ \Phi_2 = \varphi_2 + \varphi_3, \\ \Phi_3 = \varphi_3 + \varphi_4, \\ \Phi_4 = \varphi_4 + \varphi_5, \\ \dots\dots\dots, \\ \Phi_{2k} = \varphi_{2k} + \varphi_1. \end{array} \right.$$

» En raisonnant comme pour l'alternateur à 4 pôles, les équations

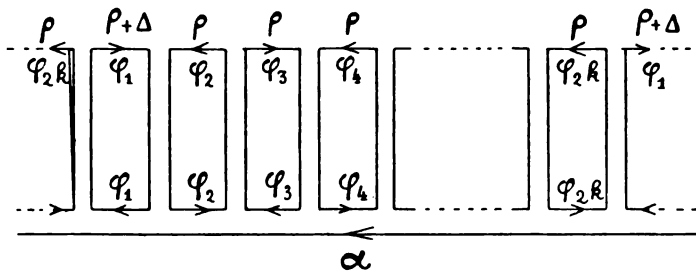


Fig. 9.

tions (32) et (33) nous conduisent immédiatement au mode de décomposition de la figure 9.

» *Deuxième mode.* — Les équations (32) et (33) peuvent encore s'écrire :

$$(32)_a \quad \left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 = \varphi'_1 - \alpha, \\ \varphi_2 = \varphi'_2 + \alpha, \\ \varphi_3 = \varphi'_3 - \alpha, \\ \dots\dots\dots, \\ \varphi_{2k} = \varphi'_{2k} + \alpha; \end{array} \right.$$

$$(33)_a \quad \left\{ \begin{array}{l} \Phi_1 = \varphi'_1 + \varphi'_2, \\ \Phi_2 = \varphi'_2 + \varphi'_3, \\ \dots\dots\dots, \\ \Phi_{2k} = \varphi'_{2k} + \varphi'_1. \end{array} \right.$$

» Nous en déduisons le mode de décomposition de la figure 10.

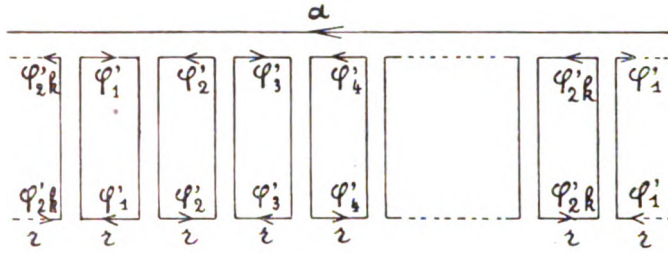


Fig. 10.

» *Troisième mode.* — Nous écrivons comme suit nos équations :

$$(32)_b \quad \left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 = \varphi'_1 - \alpha, \\ \varphi'_2 = \varphi_2 - \alpha, \\ \varphi_3 = \varphi'_3 - \alpha, \\ \varphi'_4 = \varphi_4 - \alpha, \\ \dots\dots\dots, \\ \varphi'_{2k} = \varphi_{2k} - \alpha; \end{array} \right.$$

$$(33)_b \quad \left\{ \begin{array}{l} \Phi_1 = \varphi'_1 + \varphi_2 - \alpha, \\ \Phi_2 = \varphi_2 + \varphi'_3 - \alpha, \\ \Phi_3 = \varphi'_3 + \varphi_4 - \alpha, \\ \dots\dots\dots, \\ \Phi_{2k} = \varphi_{2k} + \varphi'_1 - \alpha. \end{array} \right.$$

» Nous en déduisons le mode de décomposition de la figure 11.

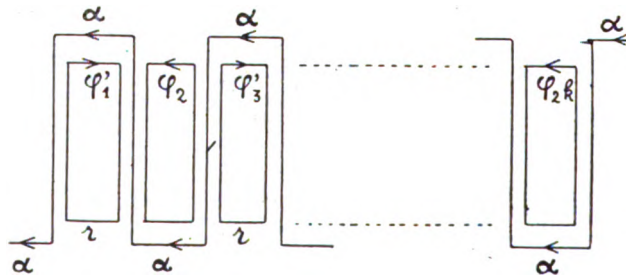


Fig. 11.

» *Quatrième mode.* — Nous pouvons encore écrire nos équations

de la façon suivante :

$$(32)_c \quad \left\{ \begin{array}{l} \varphi'_1 = \varphi_1 + \alpha, \\ \varphi_2 = \varphi'_2 + \alpha, \\ \varphi'_3 = \varphi_3 + \alpha, \\ \varphi_4 = \varphi'_4 + \alpha, \\ \dots\dots\dots \\ \varphi_{2k} = \varphi'_{2k} + \alpha; \end{array} \right.$$

$$(33)_c \quad \left\{ \begin{array}{l} \Phi_1 = \varphi_1 + \varphi'_2 + \alpha, \\ \Phi_2 = \varphi'_2 + \varphi_3 + \alpha, \\ \Phi_3 = \varphi_3 + \varphi'_4 + \alpha, \\ \Phi_4 = \varphi'_4 + \varphi_5 + \alpha, \\ \dots\dots\dots, \\ \Phi_{2k} = \varphi'_{2k} + \varphi_1 + \alpha. \end{array} \right.$$

» Nous en déduisons le mode de décomposition de la figure 12.

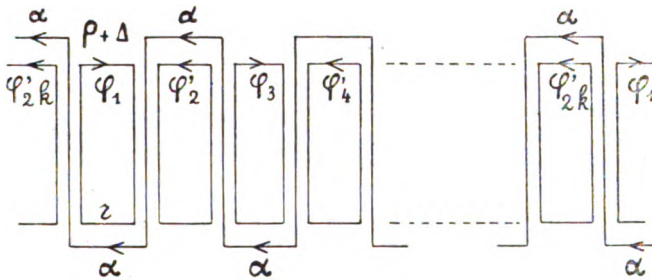


Fig. 12.

» Pour les quatre modes, le flux actif α entoure l'arbre de façon équivalente.

» *Nota.* — Le flux α changeant de sens chaque fois que le rotor tourne d'un pôle, la fréquence de la force électromotrice induite dans le circuit « arbre-palier-bâti » est la même que celle de la machine.

» On peut se proposer de chercher la valeur de tous les flux d'un réseau, tel que celui de la figure 8, qui se reproduit tous les $2k$ pôles.

» On remarquera qu'un tel réseau est symétrique (en ce qui concerne les valeurs absolues des flux, abstraction faite de leurs signes) par rapport aux droites mn , m_1n_1 , m_2n_2 , qui marquent respectivement les milieux des mailles 1, $k+1$ et $2k+1$. Ceci est bien

évident pour les mailles 1 et $2k + 1$; en effet, pour la maille 1, par exemple, cette maille présente une dissymétrie de réluctance Δ et elle est entourée à droite et à gauche par un nombre égal de mailles identiques entre elles comme réluctances et forces magnétomotrices, sauf orientation de ces dernières. Il n'y a donc aucune raison pour que les flux Φ_1 et Φ_{2k} ne soient pas égaux entre eux; donc

$$(34) \quad \left\{ \begin{array}{l} \Phi_{2k} = \Phi_1, \quad \text{en valeur absolue;} \\ \text{de même,} \\ \Phi_{2k-1} = \Phi_2, \quad \dots, \end{array} \right.$$

car les flux verticaux à gauche de mn sont les mêmes que ceux à gauche de m_2n_2 , à cause de la répétition du système tous les $2k$ pôles; il résulte des équations ci-dessus qu'on a en valeur absolue :

$$(35) \quad \left\{ \begin{array}{l} \Phi_k = \Phi_{k+1}, \\ \Phi_{k-1} = \Phi_{k+2}, \\ \dots\dots\dots, \end{array} \right.$$

c'est-à-dire que m_1n_1 est bien un axe de symétrie pour les flux verticaux, à l'orientation près de ces flux; on voit de la même façon que mn , m_1n_1 , m_2n_2 sont des axes de symétrie pour les flux horizontaux, à l'orientation près de ces flux :

$$(36) \quad \left\{ \begin{array}{l} \varphi_k = \varphi_{k+2}, \\ \varphi_{k-1} = \varphi_{k+3}, \\ \dots\dots\dots, \\ \varphi_3 = \varphi_{2k-1}, \\ \varphi_2 = \varphi_{2k}. \end{array} \right.$$

» Il en résulte que les points m' , n' , m'_1 , n'_1 , m'_2 , n'_2 sont équipotentiels magnétiques entre eux. En effet, deux points tels que m'_1 et n'_1 sont bien équipotentiels, car si l'on part du point n'_1 pour retrouver le point m'_1 en suivant le pourtour de la maille $k + 1$, soit vers la droite, soit vers la gauche, on rencontre les mêmes valeurs de flux avec les mêmes réluctances correspondantes et les mêmes forces magnétomotrices, mais les flux et les forces magnétomotrices sont de sens inverse; dans ces conditions, pour chacun

des trajets n'_1, m'_1 , il y a équilibre entre les forces magnétomotrices et les chutes de potentiel magnétiques, et les points n'_1 et m'_1 sont bien équipotentiels.

» Ceci se voit explicitement de la façon suivante :

» Soit $\psi_{n'_1 m'_1}$ la différence de potentiel magnétique entre n'_1 et m'_1 ; on a, en allant de n'_1 à m'_1 vers la gauche en suivant la maille $k+1$:

$$(37) \quad \psi_{n'_1 m'_1} = \mathcal{F} - \frac{r}{2} \varphi'_{k+1} - \mathcal{R} \Phi_k - \frac{\rho}{2} \varphi_{k+1} ;$$

or, si l'on fait le tour complet de la maille, on a :

$$(38) \quad 2\mathcal{F} - r\varphi'_{k+1} - \mathcal{R}\Phi_k - \rho\varphi_{k+1} - \mathcal{R}\Phi_{k+1} = 0 ;$$

mais

$$\Phi_{k+1} = \Phi_k, \quad \text{d'après (35)} ;$$

remplaçant dans l'équation (38), divisant par 2 et portant en (37), on obtient

$$(39) \quad \psi_{n'_1 m'_1} = 0.$$

» De même, m' et n' d'une part, m'_2 et n'_2 d'autre part, sont équipotentiels entre eux.

» Montrons enfin que deux points tels que m' et m'_1 sont équipotentiels :

» En allant de m' à m'_2 , nous pouvons écrire :

$$(40) \quad \frac{\rho + \Delta}{2} \varphi_1 - \rho \varphi_2 + \rho \varphi_3 - \dots \\ \mp \rho \varphi_k \pm \frac{\rho}{2} \varphi_{k+1} \pm \frac{\rho}{2} \varphi_{k+1} \mp \rho \varphi_{k+2} - \dots - \rho \varphi_{2k} + \frac{\rho + \Delta}{2} \varphi_{2k+1} = 0 ;$$

le signe — devant φ_k se rapporte à k pair, le signe + à k impair. Or

$$(41) \quad \begin{cases} \varphi_1 = \varphi_{2k+1}, \\ \varphi_2 = \varphi_{2k}, \\ \dots\dots\dots, \\ \varphi_k = \varphi_{k+2}. \end{cases}$$

» L'équation peut donc s'écrire :

$$(42) \quad 2 \left[\frac{\rho + \Delta}{2} \varphi_1 - \rho \varphi_2 + \rho \varphi_3 - \dots \mp \rho \varphi_k \pm \frac{\rho}{2} \varphi_{k+1} \right] = 0.$$

» Or, la quantité entre crochets est justement la différence de potentiel magnétique entre m' et m'_1 ; nous avons donc

$$(43) \quad \Psi_{m'm'_1} = 0.$$

» On trouve de même que

$$(44) \quad \Psi_{m'm'_1} = 0, \quad \dots$$

» Les points $m, m', m_1, m'_1, m_2, m'_2$ sont donc bien tous équipotentiels magnétiques entre eux.

» Tous les flux cherchés se rencontrent donc en allant simplement de la maille 1 à la maille $k+1$.

» Nous posons aisément les équations de Kirchhoff :

$$(45) \quad \left\{ \begin{array}{l} (\rho + \Delta) \varphi_1 + 2\mathfrak{R}(\varphi_1 + \varphi_2) + r(\varphi_1 + \alpha) = 2\mathcal{F}, \\ \rho \varphi_2 + \mathfrak{R}(\varphi_1 + \varphi_2) + \mathfrak{R}(\varphi_2 + \varphi_3) + r(\varphi_2 - \alpha) = 2\mathcal{F}, \\ \rho \varphi_3 + \mathfrak{R}(\varphi_2 + \varphi_3) + \mathfrak{R}(\varphi_3 + \varphi_4) + r(\varphi_3 + \alpha) = 2\mathcal{F}, \\ \dots\dots\dots \\ \rho \varphi_k + \mathfrak{R}(\varphi_{k-1} + \varphi_k) + \mathfrak{R}(\varphi_k + \varphi_{k+1}) + r(\varphi_k \mp \alpha) = 2\mathcal{F} \quad (1), \\ \rho \varphi_{k+1} + 2\mathfrak{R}(\varphi_k + \varphi_{k+1}) + r(\varphi_{k+1} \pm \alpha) = 2\mathcal{F}, \end{array} \right. \quad \text{avec}$$

$$\alpha = \frac{\Delta}{2k\rho} \varphi_1.$$

» *Formules simplifiées.* — La résolution de ce système d'équations serait intéressante; mais les solutions obtenues pour les cas particuliers où $k = 1, 2, 3$ sont déjà suffisamment complexes.

» Nous nous contenterons, dans le cas général, de calculer les flux φ en supposant que les réluctances ρ, Δ et r sont négligeables devant $\mathfrak{R}$; les équations précédentes deviennent alors :

$$(46) \quad \left\{ \begin{array}{l} 2\mathfrak{R}(\varphi_1 + \varphi_2) = 2\mathcal{F}; \\ \mathfrak{R}(\varphi_1 + \varphi_2) + \mathfrak{R}(\varphi_2 + \varphi_3) = 2\mathcal{F}; \\ \mathfrak{R}(\varphi_2 + \varphi_3) + \mathfrak{R}(\varphi_3 + \varphi_4) = 2\mathcal{F}; \\ \dots\dots\dots \end{array} \right.$$

(1) α est précédé dans cette équation du signe — pour k pair et du signe + pour k impair; l'inverse a lieu pour l'équation suivante.

» Il en résulte aussitôt, par soustraction deux à deux :

$$(47) \quad \begin{cases} \varphi_2 + \varphi_3 = \varphi_1 + \varphi_2, \\ \varphi_3 + \varphi_4 = \varphi_1 + \varphi_2, \\ \dots\dots\dots, \end{cases}$$

d'où

$$(48) \quad \begin{cases} \varphi_1 = \varphi_3 = \varphi_5 = \dots, \\ \varphi_2 = \varphi_4 = \varphi_6 = \dots, \end{cases}$$

c'est-à-dire que *tous les flux φ d'induit d'ordre impair sont égaux entre eux, et que tous ceux d'ordre pair sont aussi égaux entre eux.*

» Et comme alors, d'après (46) :

$$(49) \quad \varphi_1 + \varphi_2 = \varphi_2 + \varphi_3 = \dots = \frac{2\sqrt{f}}{2\mathfrak{A}},$$

la somme de deux flux φ consécutifs est égale à la somme de ces deux flux dans le cas où il n'y a pas de dissymétrie.

» Si dans la figure 8 nous allons de n' à n'_2 et si nous écrivons que la somme des $(r\varphi')$ est nulle, nous obtenons en divisant par $\frac{r}{2}$:

$$(50) \quad \begin{aligned} \varphi_1 + \alpha - 2\varphi_2 + 2\alpha + 2\varphi_3 + 2\alpha + \dots \\ + 2\varphi_{2k-1} + 2\alpha - 2\varphi_{2k} + 2\alpha + \varphi_{2k+1} + \alpha = 0, \end{aligned}$$

ce qui, en vertu de (48), peut s'écrire :

$$(2\varphi_1 - 2\varphi_2 + 4\alpha) + \left(\frac{2k-1-1}{2}\right)(2\varphi_1 - 2\varphi_2 + 4\alpha) = 0,$$

car

$$\varphi_{2k+1} = \varphi_1;$$

ceci donne :

$$(51) \quad \varphi_2 - \varphi_1 = 2\alpha,$$

c'est-à-dire que *la différence entre deux flux φ consécutifs est égale au double du flux circulaire différentiel α entourant l'arbre*; la valeur de α antérieurement obtenue est

$$(52) \quad \alpha = \varphi_1 \frac{\Delta}{2k\varphi}.$$

» L'équation (49) peut s'écrire

$$(53) \quad \varphi_1 + \varphi_2 = 2\varphi_n,$$

en désignant par φ_n la valeur de φ quand il n'y a pas de dissymétrie,

$$(54) \quad \varphi_n = \frac{\tilde{\varphi}}{2,0}.$$

» De (51) et (53) nous tirons

$$(55) \quad \varphi_1 = \varphi_n - \alpha;$$

d'où

$$(56) \quad \varphi_1 = \frac{\varphi_n}{1 + \frac{\Delta}{2k\rho}};$$

et en portant cette valeur en (52)

$$\alpha = \varphi_n \frac{\frac{\Delta}{2k\rho}}{1 + \frac{\Delta}{2k\rho}},$$

ou

$$(57) \quad \alpha = \varphi_n \frac{1}{1 + \frac{\Delta}{2k\rho}}.$$

» Nous tirons encore de (53)

$$(58) \quad \varphi_2 = \varphi_n \left[2 - \frac{1}{1 + \frac{\Delta}{2k\rho}} \right],$$

ou encore

$$(59) \quad \varphi_2 = \varphi_n \frac{1 + \frac{\Delta}{k\rho}}{1 + \frac{\Delta}{2k\rho}}.$$

» Nous avons d'autre part entre les flux φ' et les flux φ la relation

$$\varphi'_1 + \varphi'_2 = \varphi_1 + \varphi_2,$$

qui devient, d'après (51),

$$\begin{aligned} \varphi'_1 + \varphi'_2 &= 2\varphi_1 + 2\alpha = 2(\varphi_1 + \alpha), \\ \varphi'_1 + \varphi'_2 &= 2\varphi'_1; \end{aligned}$$

d'où

$$(60) \quad \varphi'_2 = \varphi'_1.$$

» Et, par suite,

$$(61) \quad \varphi'_1 = \varphi'_2 = \varphi'_3 = \varphi'_4 = \dots,$$

c'est-à-dire que tous les flux φ' sont égaux entre eux, et leur valeur commune est φ_n ; en effet,

$$\varphi'_1 = \varphi_1 + \alpha,$$

et l'équation (55) donne bien, d'après la précédente,

$$(62) \quad \varphi'_1 = \varphi_n.$$

» On a enfin pour les flux Φ

$$\Phi_1 = \varphi_1 + \varphi_2 = 2\varphi_n,$$

et, par suite,

$$(63) \quad \Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = \dots = 2\varphi_n.$$

» Le problème de la répartition des flux dans un réseau multipolaire est ainsi complètement résolu dans le cas des équations simplifiées par les formules (57), (48), (49), (51), (56), (59), (61), (62) et (63) :

$$(64) \quad \left\{ \begin{array}{ll} (57) & \alpha = \varphi_1 \frac{\Delta}{2\rho} = \varphi_n \frac{1}{1 + \frac{2k\rho}{\Delta}}; \\ (48) & \left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 = \varphi_3 = \varphi_5 = \dots, \\ \varphi_2 = \varphi_4 = \varphi_6 = \dots; \end{array} \right. \\ (49) & \varphi_1 + \varphi_2 = 2\varphi_n = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}; \\ (51) & \varphi_2 - \varphi_1 = 2\alpha; \\ (56) & \varphi_1 = \frac{\varphi_n}{1 + \frac{\Delta}{2k\rho}}; \\ (59) & \varphi_2 = \varphi_n \frac{1 + \frac{\Delta}{k\rho}}{1 + \frac{\Delta}{2k\rho}}; \\ (61 \text{ et } 62) & \varphi'_1 = \varphi'_2 = \varphi'_3 = \varphi'_4 = \dots = \varphi_n; \\ (63) & \Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = \dots = 2\varphi_n. \end{array} \right.$$

» La formule (57) montre nettement que l'amplitude α du flux circulaire actif entourant l'arbre diminue quand le nombre de pôles $2k$ séparant deux joints consécutifs augmente.

» Dans le cas d'un alternateur à $2k$ pôles avec un seul couple de

joints diamétraux ($2k = p$), cette formule nous donne les valeurs suivantes du rapport $\frac{\alpha}{\varphi_n}$:

Valeurs de $\frac{\alpha}{\varphi_n}$ en fonction de $\frac{\Delta}{\rho}$ pour différentes valeurs du nombre $2p$
de pôles, pour $2k = p$.

$2p.$	$2k.$	$\frac{\Delta}{\rho}$					
		$\frac{1}{4}.$	$\frac{1}{2}.$	$\frac{2}{3}.$	1.	2.	4.
4	2	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{2}$
8	4	$\frac{1}{17}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$
12	6	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{13}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{2}{5}$
16	8	$\frac{1}{33}$	$\frac{1}{17}$	$\frac{1}{13}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$
..	.	..	..	..	.	.	.
32	16	$\frac{1}{65}$	$\frac{1}{33}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{17}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{5}$
48	24	$\frac{1}{97}$	$\frac{1}{49}$	$\frac{1}{37}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{13}$	$\frac{1}{7}$
∞	∞	0	0	0	0	0	0

» Le cas théorique d'un alternateur à 2 pôles avec joint unique est le même que celui d'un alternateur à 4 pôles avec joints diamétraux ($2k = 2$); le cas d'un alternateur à 6 pôles avec trois joints d'induit à 120° est identique ($2k = 2$), etc.

» Afin d'avoir une idée de la précision que procurent les formules simplifiées (64), nous indiquerons les formules complètes dans deux cas particuliers :

$$\begin{aligned} k &= 2, \\ k &= 3, \end{aligned}$$

qui correspondent, en particulier, à des alternateurs à 8 pôles et 12 pôles avec joints diamétraux; nous avons résolu plus haut [formules (19), (16) et (18)] le cas de l'alternateur à 4 pôles ($k = 1$).

» Nous comparerons ensuite les résultats obtenus avec formules complètes et formules simplifiées dans un cas particulier.

» Alternateur à huit pôles à joints diamétraux (dissymétrie tous

les quatre pôles; $k = 2$). — Les formules (45) deviennent

$$(65) \quad \left\{ \begin{array}{l} (\rho + \Delta)\varphi_1 + 2\Re(\varphi_1 + \varphi_2) + r(\varphi_1 + \alpha) = 2\tilde{\mathcal{F}}; \\ \rho\varphi_2 + \Re(\varphi_1 + \varphi_2) + \Re(\varphi_2 + \varphi_3) + r(\varphi_2 - \alpha) = 2\tilde{\mathcal{F}}; \\ \rho\varphi_3 + \Re(\varphi_2 + \varphi_3) + r(\varphi_3 + \alpha) = 2\tilde{\mathcal{F}}; \\ \alpha = \varphi_1 \frac{\Delta}{4\rho}. \end{array} \right.$$

» En retranchant la première des équations (65) de la troisième, on obtient après transformation

$$(66) \quad \frac{\varphi_3}{\varphi_1} = 1 + \frac{\Delta}{\rho + 2\Re + r}.$$

» D'autre part, la somme des $(r\varphi')$ donne immédiatement

$$\begin{aligned} 2\varphi_2 &= \varphi_1 + \varphi_3 + 4\alpha, \\ 2\varphi_2 &= \varphi_1 \left[2 + \frac{\Delta}{\rho + 2\Re + r} + \frac{\Delta}{\rho} \right]; \end{aligned}$$

d'où

$$(67) \quad \frac{\varphi_2}{\varphi_1} = 1 + \frac{\Delta}{2} \left(\frac{1}{\rho} + \frac{1}{\rho + 2\Re + r} \right).$$

» En remplaçant φ_2 par cette valeur dans l'équation (65)₁, on obtient finalement

$$(68) \quad \varphi_1 = \frac{2\tilde{\mathcal{F}}}{\rho + 4\Re + r + \Delta \left[1 + \Re \left(\frac{1}{\rho} + \frac{1}{\rho + 2\Re + r} \right) + \frac{r}{4\rho} \right]}.$$

» Le problème est résolu par les formules (68), (67), (66) et (65).

» *Alternateur à douze pôles à joints diamétraux (dissymétrie tous les six pôles; $k = 3$).* — Les formules (45) deviennent

$$(69) \quad \left\{ \begin{array}{l} (\rho + \Delta)\varphi_1 + 2\Re(\varphi_1 + \varphi_2) + r(\varphi_1 + \alpha) = 2\tilde{\mathcal{F}}, \\ \rho\varphi_2 + \Re(\varphi_1 + \varphi_2) + \Re(\varphi_2 + \varphi_3) + r(\varphi_2 - \alpha) = 2\tilde{\mathcal{F}}, \\ \rho\varphi_3 + \Re(\varphi_2 + \varphi_3) + \Re(\varphi_3 + \varphi_4) + r(\varphi_3 + \alpha) = 2\tilde{\mathcal{F}}, \\ \rho\varphi_4 + 2\Re(\varphi_3 + \varphi_4) + r(\varphi_4 - \alpha) = 2\tilde{\mathcal{F}}, \\ \alpha = \varphi_1 \frac{\Delta}{6\rho}. \end{array} \right.$$

» En retranchant membre à membre les équations (69)₂ et

(69)₃, on obtient

$$(70) \quad (\rho + r)(\varphi_3 - \varphi_2) + \mathfrak{A}(\varphi_3 - \varphi_2 + \varphi_4 - \varphi_1) + 2r\alpha = 0.$$

» D'autre part, la somme des $(r\varphi')$ nous donne aussitôt

$$(71) \quad \varphi_3 - \varphi_2 = \frac{\varphi_4 - \varphi_1}{2} - 3\alpha.$$

» Des équations (70) et (71) on tire

$$(72) \quad \varphi_4 - \varphi_1 = 2\alpha \frac{3\rho + 3\mathfrak{A} + r}{\rho + 3\mathfrak{A} + r};$$

$$(72 \text{ bis}) \quad \frac{\varphi_4}{\varphi_1} = 1 + \frac{\Delta}{3\rho} \frac{3\rho + 3\mathfrak{A} + r}{\rho + 3\mathfrak{A} + r},$$

$$(73) \quad \varphi_3 - \varphi_2 = -2\alpha \frac{r + 3\mathfrak{A}}{\rho + 3\mathfrak{A} + r}.$$

» En retranchant (69)₁ de (69)₂, il vient

$$(74) \quad \mathfrak{A}\varphi_3 + \varphi_2(\rho + r) - \varphi_1\left(\mathfrak{A} + \rho + r + \Delta + \frac{r\Delta}{3\rho}\right) = 0.$$

» Multiplions par $\mathfrak{A}$ les deux membres de l'équation (73), après y avoir remplacé α par sa valeur (69)₁ et retranchons de (74) cette équation ainsi modifiée. Nous obtenons

$$(75) \quad \frac{\varphi_2}{\varphi_1} = 1 + \frac{\Delta \left\{ 1 + \frac{1}{3\rho} \left[r + \frac{\mathfrak{A}(3\mathfrak{A} + r)}{\rho + 3\mathfrak{A} + r} \right] \right\}}{\rho + \mathfrak{A} + r}.$$

» On trouve aisément ensuite

$$(76) \quad \frac{\varphi_3}{\varphi_1} = 1 + \Delta \left\{ \frac{1 + \frac{1}{3\rho} \left[r + \frac{\mathfrak{A}(3\mathfrak{A} + r)}{\rho + 3\mathfrak{A} + r} \right]}{\rho + \mathfrak{A} + r} - \frac{3\mathfrak{A} + r}{3\rho(\rho + 3\mathfrak{A} + r)} \right\}.$$

$$(77) \quad \varphi_1 = \frac{2\tilde{r}}{\rho + 4\mathfrak{A} + r + \Delta \left\{ 1 + \frac{r}{6\rho} + \frac{2\mathfrak{A}}{\rho + \mathfrak{A} + r} \left\{ 1 + \frac{1}{3\rho} \left[r + \frac{\mathfrak{A}(3\mathfrak{A} + r)}{\rho + 3\mathfrak{A} + r} \right] \right\} \right\}}.$$

» Le problème est résolu par les formules (77), (75), (76), (72 bis) et (69)₁.

» *Comparaison des formules complètes et simplifiées sur un exemple.*

— Soit un alternateur pour lequel les réluctances et les forces

magnétomotrices ont les valeurs suivantes, en unité C. G. S. :

$$\begin{aligned} R &= 1500.10^{-6}, \\ \rho &= 60.10^{-6}, \\ r &= 50.10^{-6}, \\ \Delta &= 120.10^{-6}, \\ 2\tilde{r} &= 15550; \end{aligned}$$

d'où résulte

$$\varphi_n = 2,545.10^6.$$

» L'application des formules donne, dans le cas d'un seul couple de joints diamétraux :

1° *Alternateurs à quatre pôles* ($2k = 2$).

	Formules	
	complètes.	simplifiées.
$\frac{\varphi_1}{\varphi_n} = \frac{\varphi_3}{\varphi_n} \dots\dots\dots$	0,498	0,5
$\frac{\varphi_2}{\varphi_n} = \frac{\varphi_4}{\varphi_n} \dots\dots\dots$	1,494	1,5
$\frac{\alpha}{\varphi_n} \dots\dots\dots$	0,498	0,5

2° *Alternateurs à huit pôles* ($2k = 4$).

	Formules	
	complètes.	simplifiées.
$\frac{\varphi_1}{\varphi_n} = \frac{\varphi_5}{\varphi_n} \dots\dots\dots$	0,656	0,666
$\frac{\varphi_2}{\varphi_n} = \frac{\varphi_4}{\varphi_n} = \frac{\varphi_6}{\varphi_n} = \frac{\varphi_8}{\varphi_n} \dots\dots\dots$	1,312	1,333
$\frac{\varphi_3}{\varphi_n} = \frac{\varphi_7}{\varphi_n} \dots\dots\dots$	0,6815	0,666
$\frac{\alpha}{\varphi_n} \dots\dots\dots$	0,328	0,333

3° *Alternateurs à douze pôles* ($2k = 6$).

	Formules	
	complètes.	simplifiées.
$\frac{\varphi_1}{\varphi_n} = \frac{\varphi_7}{\varphi_n} \dots\dots\dots$	0,73	0,75
$\frac{\varphi_2}{\varphi_n} = \frac{\varphi_6}{\varphi_n} = \frac{\varphi_8}{\varphi_n} = \frac{\varphi_{12}}{\varphi_n} \dots\dots\dots$	1,247	1,25
$\frac{\varphi_3}{\varphi_n} = \frac{\varphi_5}{\varphi_n} = \frac{\varphi_9}{\varphi_n} = \frac{\varphi_{11}}{\varphi_n} \dots\dots\dots$	0,767	0,75
$\frac{\varphi_4}{\varphi_n} = \frac{\varphi_{10}}{\varphi_n} \dots\dots\dots$	1,23	1,25
$\frac{\alpha}{\varphi_n} \dots\dots\dots$	0,243	0,25

» L'accord entre les formules complètes et les formules simplifiées est donc fort satisfaisant pour le cas considéré.

» *Remarque.* — Dans tout ce qui précède, nous avons négligé les flux de fuite du système inducteur, c'est-à-dire supposé le coefficient ν d'Hopkinson égal à l'unité. Ceci a peu d'importance : en effet, les flux de fuite peuvent être considérés comme sensiblement égaux entre tous les pôles, à cause de l'égalité des flux Φ entre eux et de la faible valeur de ρ et de $\rho + \Delta$ devant α ; et alors chacun de ces flux de fuite se ferme strictement sans entourer l'arbre.

» Dans les deux équations (27) des φ et des φ' qui fixent la valeur de α , les flux de fuite n'agissent pas s'ils sont égaux entre eux : d'une part, ils n'entrent pas dans l'équation des φ puisqu'ils ne pénètrent pas dans l'induit; d'autre part, dans l'équation des φ' , ils augmentent d'une quantité constante la valeur absolue de chaque terme φ' et comme ces termes sont en nombre pair et alternativement de sens contraire et qu'ils sont tous multipliés par r , l'équation est inchangée.

» Nous avons également supposé les réluctances constantes; la saturation relative des branches d'induit poussées en flux ne peut qu'atténuer l'importance du flux α ; la valeur obtenue pour ce flux l'est donc par excès.

» Le flux α étant connu, la force électromotrice induite dans le circuit « arbre-palier-bâti » peut être calculée par la formule (21) de Punga et Hess, laquelle suppose une variation sinusoïdale de α ; en toute rigueur, la loi d'inversion du flux α est plus complexe et est fixée par les différentes répartitions des flux correspondant à chacune des positions d'un pôle défilant devant un joint.

AUTRES TYPES DE DISSYMMÉTRIES.

» Examinons sommairement quelques autres types de dissymétries, chacune d'elles étant supposée seule existante.

» *Les dissymétries du système inducteur sont inactives.* — Ainsi que nous l'avons déjà indiqué, il est bien évident qu'une dissymétrie relative au système inducteur est inactive en ce qui concerne

la production d'une force électromotrice dans le circuit électrique « arbre-palier-bâti », puisqu'elle ne peut donner qu'une distribution de flux *constante*, tournant en bloc avec l'inducteur ou restant fixe avec lui suivant que l'inducteur est rotor ou stator; s'il y a production d'un flux α , il reste constant et ne peut rien induire. C'est le cas d'une dissymétrie augmentant l'un des r (joints dans le moyeu inducteur ou la carcasse inductrice), ou l'un des $\mathfrak{A}$ (pôle plus saillant que les autres; — pôle non équidistant de ses deux voisins; — pôle fixé de travers), ou l'un des $\mathfrak{F}$ (bobine à nombre de spires incorrect).

» *Saillie sur l'induit à l'entrefer.* — Une saillie ou un creux sur l'induit à l'entrefer, de faible largeur périphérique par rapport à l'intervalle interpolaire, ne produit aucun flux α , soit quand elle se trouve à égale distance de deux pôles, soit quand elle est coaxiale à un pôle.

» Elle ne peut produire un flux α qu'entre ces deux positions et il faut pour cela que les nœuds de rencontre des flux φ (*fig. 8*) se trouvent déplacés de manière à rendre les réluctances ρ inégales de façon appréciable. L'étude de ce cas particulier se complique du fait de la variation simultanée de $\mathfrak{A}$ pour le pôle attaquant la saillie.

» Il est à remarquer que cette dissymétrie est active, que l'induit soit stator ou rotor, car elle rencontre alternativement, dans les deux cas, des pôles inducteurs de polarités différentes.

» *Excentrage du rotor par rapport au stator.* — Si l'induit supposé de révolution est tournant, il ne peut évidemment se produire en cas d'excentrage qu'un flux α constant et par suite inactif.

» Si l'induit est fixe, l'entrefer de chaque pôle inducteur augmente puis diminue pendant un tour; la valeur des $\mathfrak{A}$ se trouve ainsi modifiée périodiquement; mais il ne peut en résulter un flux α actif appréciable qu'autant que les nœuds de rencontre des flux φ (*fig. 8*) se trouvent déplacés de façon à rendre les réluctances ρ assez inégales; *ceci exige que les différences d'entrefer sous un même pôle aient une certaine importance.*

» L'étude de cette dissymétrie devrait tenir compte des valeurs des ρ et des $\mathfrak{A}$ à chaque instant.

» Nous croyons que ces deux derniers types de dissymétrie doivent être pratiquement peu actifs, car les déplacements des nœuds de rencontre des flux φ qui en résultent semblent faibles.

» *Laminage des tôles.* — Le laminage des tôles, donnant une réluctance plus grande dans le sens normal au laminage, se ramène évidemment au cas du joint diamétral; l'influence s'en fait surtout sentir lorsque les tôles d'induit sont d'une seule pièce et qu'on n'a pas soin d'en alterner l'orientation par un repérage, suivant par exemple deux directions en quadrature, de la rainure de clavette par rapport au sens du laminage.

» *Application particulière, mais non restreinte* ⁽¹⁾, *aux grosses dynamos à courant continu.* — Les induits des dynamos à courant continu ne présentent pas de *joints diamétraux nets*, c'est-à-dire présentant un *entrefer sans fer*, comme le font les gros alternateurs, pour des raisons de construction.

» D'autre part, lorsque les carcasses d'induits d'alternateurs sont sans joints, leurs tôles sont en général d'une seule pièce.

» Les gros induits à courant continu sont donc ordinairement seuls à présenter dans sa pureté le type de dissymétrie répétée résultant de l'emploi de segments de tôle empilés à joints croisés.

» En général, il y a n segments pour la périphérie de l'induit; et comme les segments des différentes couches sont à joints croisés, il y a $2n$ joints relatifs régulièrement répartis dans le noyau induit et à l'endroit desquels la section de tôle est moitié de celle habituelle.

» Désignons d'une façon plus générale par k le nombre de ces points de réluctance anormale et équidistants.

» Le nombre de pôles de la machine étant $2p$, nous avons p pôles nord, par exemple, et il y a deux fréquences de répétition du système lorsque l'induit tourne :

» 1^o Le système se répète chaque fois qu'un même joint donné passe devant un pôle nord quelconque : nous retrouvons ici la fréquence de la machine;

⁽¹⁾ Comme tout ce qui précède, ce qui suit s'applique en toute rigueur aussi bien aux alternateurs qu'aux dynamos à courant continu.

» 2° Le système se répète encore chaque fois que l'un quelconque des k joints passe devant un quelconque des p pôles nord.

» Si p et k sont premiers entre eux, chaque joint rencontre dans un tour p pôles nord, et les k joints en rencontrent kp dans la même position relative ⁽¹⁾, c'est-à-dire que le système se répète kp fois pour un tour de l'induit. Et si la vitesse angulaire de l'induit est $\frac{n}{60}$ tours par seconde, la fréquence f de répétition du système est

$$(78) \quad f = \frac{n}{60} kp.$$

» Si k et p ne sont pas premiers entre eux, soit x leur plus grand commun diviseur, posons

$$(79) \quad \begin{cases} p = \mu x, \\ k = \eta x; \end{cases}$$

μ et η sont premiers entre eux, et $(\mu\eta, x)$ est le plus petit commun multiple de p et de k .

» Divisons la circonférence de l'induit en x parties; pour chacune de ces parties, nous avons μ paires de pôles et η joints; μ et η étant premiers entre eux, nous retombons sur le cas précédent :

» L'induit parcourant l'une des x parties, le système se répète un nombre de fois égal à $\mu\eta$.

» L'induit faisant un tour, c'est-à-dire parcourant les x parties, le système se répète $\mu\eta x$ fois; et pendant une seconde, l'induit faisant $\frac{n}{60}$ tours, la fréquence f' de répétition du système sera

$$(80) \quad f' = \frac{n}{60} \mu \eta x.$$

» Les fréquences f ou f' du flux α actif peuvent être beaucoup plus grandes que celles de la machine.

» A première vue, il semble d'après cela possible de concevoir un alternateur à fréquence élevée et à nombre de pôles réduit; en

(¹) Les rencontres se font à intervalles de temps égaux.

faisant par exemple dans la formule (78)

$$\frac{n}{60} = 25,$$

$$k = 39,$$

$$p = 20,$$

on obtient :

$$f = 19\,500 \text{ périodes par seconde.}$$

» L'alternateur pourrait être réalisé en faisant débiter l'arbre, par l'intermédiaire de balais, sur le primaire d'un transformateur et l'on utiliserait la résonance; les tôles d'induit et d'inducteur seraient excessivement minces et les joints d'induit deviendraient de vrais entrefers. Le primaire du transformateur pourrait être constitué par le circuit électrique « arbre-palier-bâti » avec shuntages par balais entre arbre et paliers, le noyau magnétique du transformateur entourant l'arbre; plus simplement, on éviterait le noyau magnétique supplémentaire en employant un arbre creux dans lequel passerait l'enroulement secondaire. Malheureusement l'amplitude du flux α devient faible quand les nombres de joints et de pôles augmentent, puisque le taux d'importance de la dissymétrie diminue.

» A titre d'exemple, mais pour lequel f' est petit, nous citerons une dynamo à courant continu à 12 pôles de 1250 kilowatts, 375 tours par minute. Il y avait 9 segments de tôle par circonférence; les joints étant croisés, leur nombre était de 18. Nous avons donc ici :

$$p = 6 = 1 \times 6,$$

$$k = 18 = 3 \times 6,$$

$$\mu = 1,$$

$$\eta = 3,$$

$$x = 6,$$

$$\frac{n}{60} = 6,25;$$

et la formule (80) nous donne

$$f' = 6,25 \times 1 \times 3 \times 6,$$

$$f' = 112,5 \text{ périodes par seconde,}$$

ce qui était bien la fréquence de la courbe de force électromotrice relevée à l'oscillographe entre les deux extrémités de l'arbre.

NOTE.

» *Remarque au sujet du flux α .* — Nous avons vu que, dans tous les cas, un *réseau multipolaire de flux magnétiques* est décomposable en une série de flux strictement fermés n'entourant pas l'arbre, et en un flux α strictement fermé entourant l'arbre.

» Ce flux α est égal à la somme algébrique de tous les flux qui traversent un demi-plan partant de l'arbre et s'étendant à l'infini dans une direction quelconque d'un côté de l'arbre.

» Il y a là une propriété tout à fait générale d'un *réseau quelconque* de flux magnétiques ou de courants électriques qu'on peut exprimer sous forme de règles :

» **RÈGLES RELATIVES AUX RÉSEAUX QUELCONQUES DE FLUX OU DE COURANTS.** — I. *Un réseau quelconque de flux ou de courants est décomposable en un nombre entier exact de circuits de flux ou de courants strictement fermés.* — Nous avons fait déjà ressortir cette règle, en ce qui concerne les courants, dans la première partie de cette Communication; la seconde partie la fait ressortir, en ce qui concerne les flux.

» II. *Si l'on considère un réseau quelconque de flux ou de cou-*

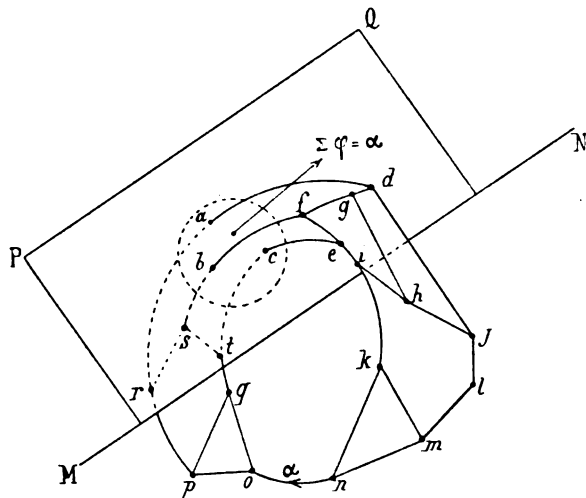


Fig. 13.

rants (fig. 13) dont les nœuds sont en *defg...rst*, si l'on mène une droite quelconque MN à travers ce réseau, la somme algébrique

Ces deux propositions sont donc adoptées à l'unanimité des suffrages.

M. le PRÉSIDENT. — « Ce vote unanime est une éclatante manifestation de l'union sacrée qui règne dans la Société comme dans le Pays tout entier et qui lui permettra certainement de traverser victorieusement les difficultés de la situation présente. Ceux de nos collègues auxquels vous venez de donner cette grande marque de confiance en seront profondément touchés et je vous remercie très sincèrement en leur nom à tous. »

La séance est levée à 18 h 25 m.

LISTE DES OUVRAGES

OFFERTS A LA SOCIÉTÉ INTERNATIONALE DES ÉLECTRICIENS.

(Suite.)

La Bibliothèque est ouverte aux Membres de la Société, tous les jours,
de 15 heures à 18 heures, excepté les dimanches et jours de fêtes,
12, rue de Staël.

France.

Annuaire pour l'an 1915, publié par le Bureau des Longitudes, avec une Notice scientifique. Paris, Gauthier-Villars et C^{ie}, 1915; 1 vol. in-32, broché. (Don de l'éditeur.)

Détermination de la position des projectiles dans le corps humain par la radioscopie. Note de M. FOVEAU DE COURMELLES. — Paris, Gauthier-Villars, 1915; 1 brochure in-4°. (Extrait des *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, séance du 18 janvier 1915.) (Don de l'auteur.)

Perturbations (Les) du champ magnétique terrestre au voisinage des dynamos. Leur mesure, par C. LIMB. Lyon, imprimerie A. Rey, 1913; une brochure in-8°. (Extrait de la *Société d'Agriculture, Sciences et Industrie de Lyon*.) (Don de l'auteur.)

Tables annuelles des constantes et données numériques de Chimie, de Physique et de Technologie, publiées sous le patronage de l'Association internationale des Académies, par le Comité international nommé par le VII^e Congrès de Chimie appliquée. Vol. III. Année 1912. Paris, Gauthier-Villars et C^{ie}, 1914; 1 vol. gr. in-4°, broché.

Extraits du Volume III des *Tables annuelles* :

1^o *Art de l'Ingénieur et Métallurgie. Résistance des matériaux et données numériques diverses.*

2^o *Données numériques de l'Électricité. Magnétisme et Electrochimie.*

3^o *Données numériques de Radioactivité. Atomistique. Électronique et Ionisation,*

Paris, Gauthier-Villars et C^{ie}, 1914; 3 vol. gr. in-4°, cartonnés. [Volume de Tables et Extraits offerts par M. MARIE (Ch.), Secrétaire général de la Commission permanente du Comité international.]

IL Y A TRENTÉ ANS.

Avril 1885. — Conférences faites à l'Exposition d'électricité organisée par la Société à l'Observatoire de Paris : Applications de l'électricité à l'art militaire, par M. LE ROUX. — Applications de l'électricité aux chemins de fer, par M. P. JOUSSELIN. — Télégraphie, par M. E. BAUDOT. — L'éclairage électrique domestique, par M. E. HOSPITALIER.

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ INTERNATIONALE
DES
ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Compte rendu de la réunion mensuelle du 6 mai 1915 : Admission de Membre titulaire, p. 166. — Membres décédés, p. 166. — Sur la mesure du rendement par les méthodes directes (M. C.-F. Guilbert), p. 167.

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES, p. 193.

BIBLIOGRAPHIE, p. 196.

IL Y A 30 ANS, p. 196.

COMPTE RENDU

DE LA

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du jeudi 6 mai 1915 ⁽¹⁾.

PRÉSIDENCE DE M. BRYLINSKI.

La séance est ouverte à 17 h 5 m.

Le procès-verbal de l'Assemblée générale et de la réunion mensuelle tenues le 1^{er} mai est adopté.

M. le PRÉSIDENT exprime son profond regret d'avoir à faire

(¹) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

part de nouveaux décès de Sociétaires morts au champ d'honneur et à la vaillance desquels il rend hommage :

M. *Chevallier (Robert)*, tombé le 20 août, en Lorraine;

M. *Cohen (Édouard)*, mort au combat de Courbesseaux, le 25 août 1914;

M. *Tirefort (C.-M.-E.-Roger)*, sous-lieutenant au 276^e d'Infanterie, blessé mortellement au combat de Crouy, le 10 janvier 1915, en entraînant sa section à l'assaut; cité à l'ordre du jour.

Aux côtés de ces glorieuses victimes de la guerre, la Société se doit de placer M. *Grosselin (Robert)*, Saint-Cyrien de la promotion de Montmirail, tombé à l'assaut d'une tranchée, le 29 janvier :

M. le PRÉSIDENT. — « Je ne connaissais pas personnellement le sous-lieutenant Grosselin, mais son père, qui présidait nos séances il y a bien peu d'années et qui remplit vaillamment son devoir d'officier, a rendu de trop éminents services à notre Société, et avec trop d'inlassable bonne grâce, pour que son deuil ne soit pas notre deuil à tous. A sa mère, dont le concours dévoué a été si utile pendant le Congrès réuni en commun avec nos amis britanniques il y a deux ans, et qui n'a pu qu'embrasser fugitivement son fils au moment même où, plein d'une patriotique ardeur, il s'élançait à la frontière avec ses camarades, j'adresse également avec une profonde émotion l'expression respectueuse de la vive part que nous prenons tous à sa cruelle douleur. »

Est élu membre titulaire de la Société internationale des Électriciens :

M. **de Watteville** (Henry), Ingénieur à la Société française des Câbles électriques, 15, rue Saint-Clair, à Lyon (Rhône). — Présenté par MM. Brylinski et Eug. Dumon.

L'ordre du jour appelle les Communications techniques.

SUR LA MESURE DU RENDEMENT PAR LES MÉTHODES DIRECTES.

M. C.-F. GUILBERT. — « Messieurs, les quelques réflexions que je veux vous présenter ce soir auraient fait, en temps de paix, l'objet d'une simple communication de section, car il s'agit beaucoup plus de la mise au point d'une question intéressante que de l'exposé de méthodes nouvelles.

» Mon but est d'examiner les différentes formules qui ont été données pour l'évaluation du rendement par les méthodes directes, d'indiquer les hypothèses auxquelles correspondent ces formules et, enfin, de classer les valeurs obtenues entre elles et par rapport à celles des rendements réels.

» Les méthodes directes de mesure du rendement des dynamos et moteurs à courant continu ont pour objet la détermination de ce rendement dans les conditions mêmes de fonctionnement des machines ou, tout au moins, dans certains cas, dans des conditions simplement voisines.

» Les seules méthodes que nous ayons en vue ici sont, en principe, celles qui, permettant une récupération de l'énergie produite, facilitent beaucoup les essais en n'exigeant qu'une puissance restreinte, mais qui ne sont applicables que pour les essais de deux dynamos identiques manchonnées en bout d'arbre.

» Nous classerons ces méthodes en deux groupes :

» 1^o Celles qui ne permettent la mesure du rendement que pour des régimes peu différents de la pleine charge, de façon que les hypothèses faites soient suffisamment vérifiées;

» 2^o Celles qui permettent l'étude du rendement exact en fonction de la charge.

» Les premières comprennent les méthodes classiques :

» 1^o de Fontaine et Cardew (sans récupération) (*fig. 1*);

» 2^o de Lord Rayleigh (connue aussi sous le nom de Kapp) (*fig. 2*);

- » 3^o de Potier (*fig. 3*);
- » 4^o d'Hopkinson (*fig. 5*).

» Les secondes, qui ne sont d'ailleurs que des combinaisons de deux des premières, sont celles :

- » 1^o de M. Blondel (*fig. 7*);
- » 2^o de Hutchinson (*fig. 8, 9 et 10*).

» Ces dernières ont été imaginées pour la mesure du rendement des moteurs de tramways, mais elles sont naturellement applicables à tous les cas.

» Pour ce qui va suivre, nous partagerons les premières en deux séries :

» 1^o Celles où la puissance nécessaire aux pertes dans les deux machines à essayer est fournie *électriquement*, c'est-à-dire où la machine motrice absorbe une puissance électrique supérieure à celle donnée par la génératrice;

» 2^o Celle, unique (Hopkinson), où les puissances électriques absorbée, par le moteur et donnée par la génératrice sont les mêmes, c'est-à-dire où la puissance nécessaire aux pertes est fournie *mécaniquement*.

» Laissant de côté les modes opératoires avec ces différentes méthodes, nous nous occupons seulement de l'évaluation du rendement par la connaissance des mesures nécessaires faites sur les machines.

» I. MESURE DU RENDEMENT EN CHARGE NORMALE. — *a. Méthodes de la première série.* — Prenons d'abord les méthodes de la première série (*fig. 1, 2, 3*). Désignons par P la puissance de la dynamo fonctionnant comme génératrice et par p ses pertes, par P' la puissance de la machine motrice et par p' ses pertes, et sans spécifier, pour le moment, si les pertes par excitation sont ou non comprises.

» Les formules généralement indiquées dans les ouvrages, et souvent sans justification, appartiennent à quatre hypothèses différentes que nous allons examiner.

» 1. *Égalité des rendements des deux machines.* — Le rendement de la génératrice étant

$$\eta = \frac{P}{P + p}$$

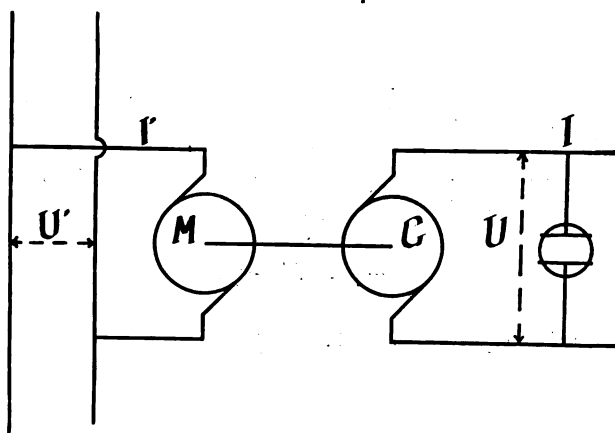


Fig. 1. — Schéma réduit de la méthode Fontaine-Cardew.

et celui η' du moteur

$$\eta' = \frac{P' - p'}{P'}$$

l'égalité des rendements conduit à

$$\frac{P}{P + p} = \frac{P' - p'}{P'}$$

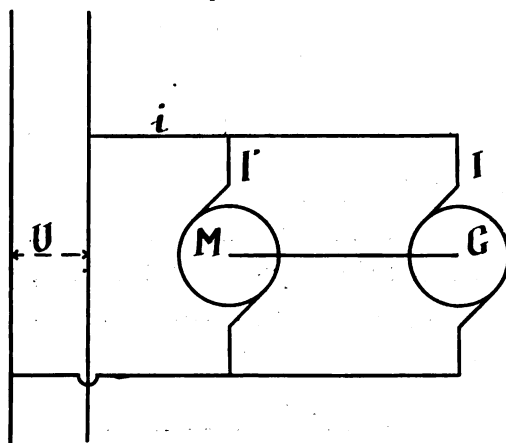


Fig. 2. — Schéma réduit de la méthode de Lord Rayleigh.

» Comme on a évidemment

$$P' = P + p + p',$$

l'égalité précédente peut s'écrire, par une propriété des rapports égaux,

$$\frac{P}{P+p} = \frac{P'-p'}{P'} = \frac{p}{p'},$$

résultat d'ailleurs intuitif.

» Le moteur ayant une puissance électrique supérieure à celle de la dynamo, on a toujours $p' > p$, l'hypothèse est donc plausible. De plus, les deux machines sont ici à égalité de puissance mécanique, ainsi que cela résulte de l'égalité

$$P + p = P' - p'.$$

» On peut remarquer, en outre, qu'à moins que p' soit assez

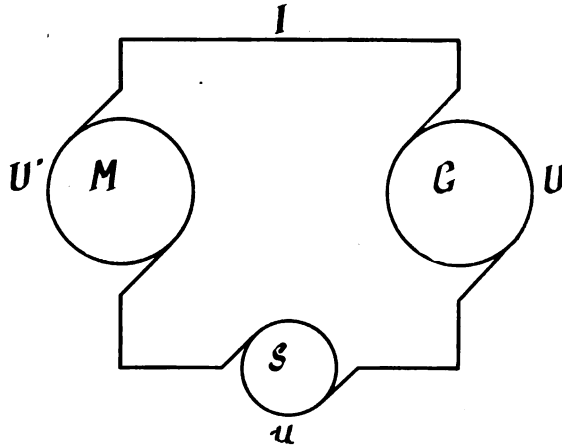


Fig. 3. — Schéma réduit de la méthode de Potier.

supérieur à p , c'est-à-dire qu'il s'agisse de machines à rendement faible et, par suite, de faible puissance, le rendement en moteur, à égalité de puissance mécanique, sera toujours, pour le régime normal, plus grand que celui en génératrice. Il suffit, en effet, de mettre les rendements sous la forme

$$\eta' = \frac{P' - p'}{P'} = \frac{P + p}{P + p' + p},$$

$$\eta = \frac{P}{P + p},$$

pour que ceci apparaisse clairement.

» On a donc bien

$$\eta' > \eta,$$

inégalité qui entraîne en même temps ⁽¹⁾

$$\frac{p}{p'} > \eta'.$$

» Si l'on représente les valeurs de η et η' en fonction de la puissance mécanique reçue ou communiquée, on obtient les courbes de la figure 4. Ces courbes ne se traversent en général que pour une puissance bien supérieure à la puissance normale.

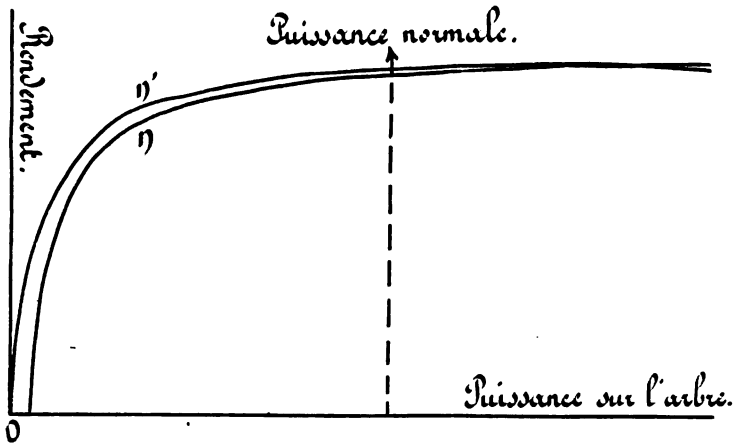


Fig. 4. — Courbes de rendement en fonction de la puissance sur l'arbre.

» La divergence des deux rendements augmenterait encore si l'on tenait compte directement des excitations, tant que l'excita-

⁽¹⁾ On a, en effet,

$$\frac{P' - p'}{P'} > \frac{P}{P + p},$$

et comme

$$P' - p' = P + p,$$

on a

$$(P' - p')^2 > P'(P' - p - p'),$$

ou

$$pP' > p'(P' - p'),$$

et enfin

$$\frac{p}{p'} > \frac{P' - p'}{P'},$$

c'est-à-dire

$$\frac{p}{p'} > \eta'.$$

tion du moteur sera plus petite que celle de la génératrice, ce qui aura lieu en général pour celles des méthodes considérées (Fontaine-Cardew et Lord Rayleigh) où la différence de potentiel aux bornes est la même pour les deux dynamos.

» On n'aura donc pas intérêt, au point de vue de l'exactitude de l'hypothèse, à tenir compte directement des excitations en les faisant rentrer dans les pertes p et p' (1).

» Pour la méthode de Potier, des raisons expérimentales exigeant l'emploi d'une excitation séparée, on en conclut que, sauf pour de très petites machines, toutes les méthodes de la série considérée devront tenir compte indirectement de l'excitation par les formules classiques

$$\eta_{\text{réel}} = \eta \frac{P + p}{P + p + p_e},$$

$$\eta'_{\text{réel}} = \eta' \frac{P' - p' - p'_e}{P' - p'},$$

p_e et p'_e étant les pertes par excitation.

» L'égalité des rendements conduit, en remarquant que

$$\eta \eta' = \frac{1}{P'},$$

à

$$\eta = \eta' = \sqrt{\frac{P}{P'}}.$$

» Si nous explicitons les expressions de P et P' en fonction des différences de potentiel aux bornes U et U' de la génératrice et du moteur et des courants correspondants I et I' , nous aurons :

» 1^o *Méthode de Fontaine-Cardew*

$$\eta = \eta' = \sqrt{\frac{UI}{U'I'}} = \sqrt{\frac{U}{U'} \frac{I}{I'}};$$

» 2^o *Méthode de Lord Rayleigh* ($U = U'$)

$$\eta = \eta' = \sqrt{\frac{I}{I'}};$$

(1) Les conclusions seraient renversées si l'on avait $\eta > \eta'$, ce qui entraînerait

$$\frac{P}{P'} < \eta'.$$

» 3^o Méthode de Potier ($I = I'$) (1)

$$\eta = \eta' = \sqrt{\frac{U}{U'}}.$$

» 2. *Égalité des pertes dans les deux machines.* — Une seconde hypothèse est d'admettre que les pertes dans les deux machines sont identiques par suite d'une compensation plus ou moins complète.

» On a alors

$$p = p' = \frac{P' - P}{2},$$

et les rendements sont : pour la génératrice,

$$\eta = \frac{P}{P + \frac{P' - P}{2}} = \frac{2P}{P + P'},$$

et, pour le moteur,

$$\eta' = \frac{P' - \frac{P' - P}{2}}{P'} = \frac{P + P'}{2P'}.$$

» Comme nous savons qu'on a $p' > p$, nous nous rapprocherons ici de l'égalité des pertes en tenant compte *directement* des excitations dans les méthodes de Cardew-Fontaine et Lord Rayleigh.

» Explicitées pour les différentes méthodes considérées, les formules seront :

(1) Les formules pour les méthodes de Lord Rayleigh et de Potier sont souvent mises sous la forme

$$\eta = \sqrt{\frac{I}{I + i}} \quad \text{et} \quad \eta = \sqrt{\frac{U}{U + u}},$$

en désignant par i le courant fourni par le réseau ou par u la tension du survolteur.

Nous préférons les formes signalées plus haut, parce qu'elles font intervenir les rapports $\frac{I}{I'}$ et $\frac{U}{U'}$, que nous introduisons de préférence, car il est bien entendu que la précision exigera que nous mesurions les mêmes grandeurs physiques avec le même appareil de façon à éliminer autant que possible les erreurs systématiques.

» 1^o *Méthode de Fontaine-Cardew*

$$\eta = \frac{2UI}{UI + U'I'} = \frac{2}{1 + \frac{U'}{U} \frac{I'}{I}},$$

$$\eta' = \frac{UI + U'I'}{2U'I'} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{U}{U'} \frac{I}{I'} \right);$$

» 2^o *Méthode de Lord Rayleigh* ($U = U'$)

$$\eta = \frac{2I}{I + I'} = \frac{2}{1 + \frac{I'}{I}},$$

$$\eta' = \frac{I + I'}{2I'} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{I}{I'} \right) \quad (1);$$

» 3^o *Méthode de Potier* ($I = I'$) (2)

$$\eta = \frac{2U}{U + U'} = \frac{2}{1 + \frac{U'}{U}},$$

$$\eta' = \frac{U + U'}{2U'} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{U}{U'} \right).$$

» 3. *Égalité des pertes pour le régime moyen.* — La troisième hypothèse consiste en une cote mal taillée. On suppose que les

(1) Si l'on tenait compte directement des excitations, on aurait, en désignant par I_e et I'_e les courants d'excitation de la génératrice et du moteur sous les tensions U et U' :

1^o *Méthode de Cardew-Fontaine*

$$\eta = \frac{2}{1 + \frac{I_e}{I} + \frac{U'}{U} \frac{I'}{I}}, \quad \eta' = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{I'_e}{I'} + \frac{U}{U'} \frac{I}{I'} \right);$$

2^o *Méthode de Lord Rayleigh*

$$\eta = \frac{2}{1 + \frac{I_e}{I} - \frac{I'}{I}}, \quad \eta' = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{I_e}{I} + \frac{I}{I'} \right).$$

(2) Les formules, sous leur forme plus commune, sont

$$\eta = \frac{2I}{2I + i}, \quad \eta' = \frac{2I + i}{2(I + i)},$$

$$\eta = \frac{2U}{2U + u}, \quad \eta' = \frac{2U + u}{2(U + u)}.$$

pertes sont égales pour le régime moyen, c'est-à-dire $\frac{P+P'}{2}$, régime moyen que, suivant les procédés d'emploi des méthodes directes, on s'efforce d'égaliser, ou mieux, de rapprocher du régime normal, condition indispensable à réaliser lorsque la puissance des machines à essayer est assez faible, c'est-à-dire les rendements assez petits.

» Les rendements cherchés sont alors donnés par les formules

$$\eta = \frac{\frac{P+P'}{2}}{\frac{P+P'}{2} + \frac{P'-P}{2}} = \frac{P+P'}{2P'}$$

pour la génératrice et

$$\eta' = \frac{\frac{P+P'}{2} - \frac{P'-P}{2}}{\frac{P+P'}{2}} = \frac{2P}{P+P'}$$

pour le moteur.

» Ce sont les mêmes formules que pour l'hypothèse précédente, mais en ordre inverse; celle de la génératrice est remplacée par celle du moteur et *vice versa*.

» En ce qui concerne les excitations, l'égalité des puissances électriques aux bornes nous ramène à la deuxième série de méthodes qui sera examinée plus loin et où nous montrerons qu'il y a intérêt à tenir compte directement des excitations.

» En explicitant, comme dans le cas précédent, les formules pour chacune des méthodes, on obtiendra évidemment les mêmes résultats, mais en ordre inverse pour la génératrice et le moteur.

» 4. *Égalité des pertes et des rendements pour le régime de la génératrice.* — Certaines formules données dans quelques ouvrages où elles ne sont pas d'ailleurs justifiées, même par un raisonnement spécieux, nécessitent pour les retrouver de faire successivement les deux hypothèses de l'égalité des pertes, puis de celle des rendements pour le régime particulier de la génératrice, ce qui manque un peu de logique.

» Si nous multiplions membres à membres les expressions de η

et η' à égalité des pertes pour le régime de la génératrice, ou P , c'est-à-dire

$$\eta = \frac{P}{P + \frac{P - P'}{2}} = \frac{2P}{P + P'},$$

résultat déjà indiqué, et

$$\eta' = \frac{P - \frac{P' - P}{2}}{P} = \frac{3P - P'}{2P},$$

nous obtenons, en supposant ensuite les rendements égaux,

$$\eta = \eta' = \sqrt{\frac{P - \frac{P' - P}{2}}{P + \frac{P' - P}{2}}} = \sqrt{\frac{3P - P'}{P + P'}}.$$

» Cette formule n'est, à notre avis, qu'une simple réminiscence d'une autre que nous trouverons plus loin par la méthode d'Hopkinson et qui se justifie alors beaucoup mieux.

» On remarquera que cette formule peut se déduire de

$$\eta = \eta' = \sqrt{\frac{P}{P'}},$$

en retranchant du numérateur et du dénominateur de $\frac{P}{P'}$ la moitié des pertes totales, ce qui éloignera cette fraction et, par suite, sa racine carrée de l'unité. Elle donnera donc des valeurs plus faibles que $\sqrt{\frac{P}{P'}}$ (1).

(1) On pourrait tout aussi bien considérer le régime de la puissance du moteur, ou P , au lieu de P' . On arriverait alors à la formule

$$\eta = \sqrt{\frac{P + P'}{3P' - P}}.$$

Cette formule résulterait cette fois de l'addition au numérateur et au dénominateur de $\frac{P}{P'}$ de la moitié des pertes, ce qui rapprocherait cette fraction de l'unité, de sorte que la formule donnerait une valeur plus forte que $\sqrt{\frac{P}{P'}}$.

» Nous n'explicitons cette formule que pour les deux cas suivants :

» 1^o Méthode de Lord Rayleigh ($U = U'$)

$$\eta = \eta' = \sqrt{\frac{3I - I'}{I + I'}} = \sqrt{\frac{3 - \frac{I'}{I}}{1 + \frac{I'}{I}}}$$

» 2^o Méthode de Potier ($I = I'$) (1)

$$\eta = \eta' = \sqrt{\frac{3U - U'}{U + U'}} = \sqrt{\frac{3 - \frac{U'}{U}}{1 + \frac{U'}{U}}}$$

» Après avoir rappelé les différentes formules qui sont employées avec les trois méthodes considérées, nous allons maintenant rechercher ce qu'on peut dire sur leur exactitude relative.

» Il est d'abord facile d'établir qu'on a les inégalités suivantes (2) :

$$\frac{P + P'}{2P'} > \sqrt{\frac{P}{P'}} > \frac{2P}{P + P'} > \sqrt{\frac{3P - P'}{P + P'}}$$

» Nous n'avons donc qu'à rechercher où se placent les rendements réels dans cette suite de nombres décroissants.

» Si nous nous limitons au cas le plus commun, indiqué plus haut, où l'on a

$$\frac{P}{P'} > \eta' > \eta,$$

on peut vérifier, tout aussi facilement, que la classification se fait

(1) Les formules sous leur forme plus commune sont

$$\eta = \sqrt{\frac{2I - i}{2I + i}}, \quad \eta' = \sqrt{\frac{2U - u}{2U + u}}.$$

(2) Les deux premières expriment en effet que la moyenne arithmétique est supérieure à la moyenne géométrique. Quant à la troisième, elle peut s'écrire, en élevant au carré,

$$4P^2 > (3P - P')(P + P')$$

ou

$$P^2 > 2PP' - P'^2,$$

c'est-à-dire

$$(P' - P)^2 > 0.$$

de la manière suivante ⁽¹⁾ :

$$\frac{P + P'}{2P'} > \eta' > \sqrt{\frac{P}{P'}} > \eta > \frac{2P}{P + P'} > \sqrt{\frac{3P - P'}{P + P'}}.$$

» On peut donc en conclure que les deux premières hypothèses faites, égalité des rendements ou égalité des pertes, sont les plus plausibles et que, suivant qu'il s'agit d'une génératrice ou d'un moteur, l'égalité des rendements donne une valeur trop élevée ou une valeur trop faible et celle des pertes une valeur trop faible ou une valeur trop élevée ⁽²⁾.

» On ne peut néanmoins aller plus loin, c'est-à-dire rechercher l'ordre de grandeur des différences entre les divers termes, car la valeur la plus approchée, par défaut ou par excès, ne dépend pas seulement de la méthode, mais aussi de la répartition des pertes dans chaque machine.

» Nous remarquerons seulement que l'expression $\sqrt{\frac{P}{P'}}$ a l'avantage d'être comprise entre les deux rendements réels et qu'elle est de ce fait d'une plus grande généralité. Évidemment, les différences entre les diverses valeurs sont d'autant plus faibles que les

⁽¹⁾ En effet, la deuxième et la troisième sont évidentes, puisque

$$\eta\eta' = \sqrt{\frac{P}{P'}}.$$

Quant à la première et à la quatrième, on les établit ainsi :

On doit avoir, par exemple, pour la première

$$\frac{P + P'}{2P'} > \frac{P' - p'}{P'},$$

ou

$$P + P' > 2(P' - p'), \text{ c'est-à-dire } P > P' - 2p',$$

ce qui est exact, puisqu'on a

$$P = P' - p - p'$$

avec

$$p' > p.$$

⁽²⁾ Avec l'hypothèse $\eta' > \eta$, par suite aussi

$$\eta' > \frac{P}{P'}.$$

il n'y aurait qu'à interchanger η et η' , la conclusion générale reste la même, mais les différences entre les valeurs réelles et les valeurs trouvées sont changées de signe.

rendements sont plus élevés. Avec des rendements de l'ordre de 90 pour 100, la différence entre les termes extrêmes est de l'ordre de 2 pour 100 environ.

» *b. Méthode de la deuxième série.* — Passons maintenant à la méthode d'Hopkinson (fig. 5). La puissance électrique des deux machines est ici la même, P .

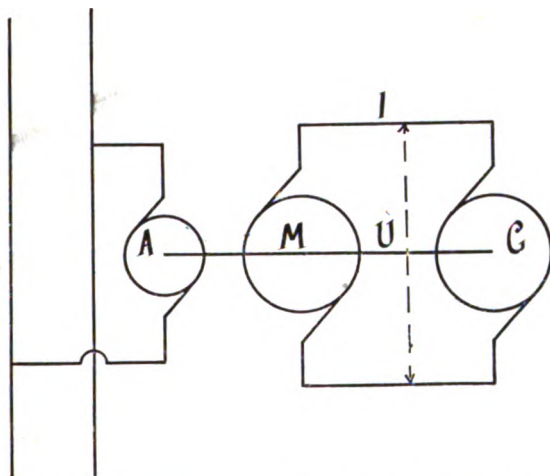


Fig. 5. — Schéma réduit de la méthode d'Hopkinson.

» Les formules généralement indiquées appartiennent par suite à trois types seulement.

» 1. *Égalité des rendements.* — Le rendement de la génératrice étant

$$\eta = \frac{P}{P + p}$$

et celui du moteur

$$\eta' = \frac{P - p'}{P},$$

l'égalité des rendements conduit ici à

$$\frac{P}{P + p} = \frac{P - p'}{P} = \frac{p'}{p}.$$

» Le moteur ayant une puissance électrique égale à celle de la génératrice et ses pertes étant plus petites pour le fer, on a bien

$p' < p$, mais le rendement du moteur peut être supérieur ou inférieur à celui de la génératrice pour une même puissance aux bornes.

» A moins qu'il ne s'agisse de petites machines, c'est-à-dire d'un rendement faible et avec forte saturation dans l'induit, à égalité de puissance aux bornes le rendement de la génératrice sera supé-

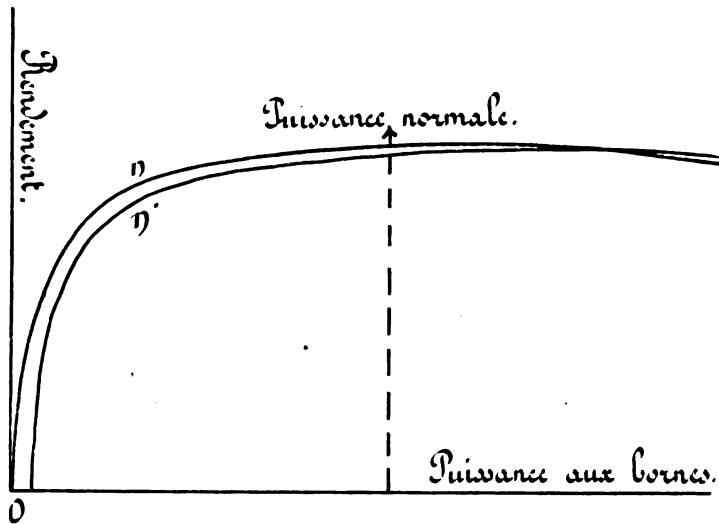


Fig. 6. — Courbes de rendement en fonction de la puissance électrique fournie ou absorbée.

rieur à celui du moteur : $\eta > \eta'$ ⁽¹⁾. Cette inégalité entraîne d'ailleurs la suivante :

$$\eta < \frac{p'}{p}.$$

» On a donc ici, en général,

$$\frac{p'}{p} > \eta > \eta'.$$

» L'excitation du moteur étant plus faible que celle de la génératrice, on rapprochera le rendement du moteur de celui de la génératrice en tenant compte des excitations directement.

» Passons à la formule. On a

$$\eta = \frac{P}{P + p} = \frac{p'}{p}.$$

(¹) Si l'on représente encore les valeurs de η et η' en fonction cette fois de la puissance électrique fournie ou absorbée, on obtient les courbes de la figure 6.

» Soit p_1 la somme des pertes fournies par le moteur auxiliaire aux arbres des deux dynamos.

» Nous avons

$$p_1 = p + p' = (1 + \eta_1)p,$$

d'où

$$p = \frac{p_1}{1 + \eta_1}$$

et par suite

$$\eta_1 \left(p + \frac{p_1}{1 + \eta_1} \right) = p$$

et

$$\eta_1^2 p + \eta_1 p_1 - p = 0.$$

Une seule racine est acceptable : c'est la valeur positive, elle est

$$\eta_1 = \frac{\sqrt{p_1^2 + 4p^2} - p_1}{2p} = \sqrt{1 + \frac{p_1^2}{4p^2}} - \frac{p_1}{2p},$$

qu'on peut écrire approximativement, en développant le radical en série et en ne conservant que les deux premiers termes,

$$\eta_1 = \frac{2p - p_1}{2p}.$$

» Un raisonnement spécieux fait dire souvent que le rendement global des deux machines est $\frac{p}{p + p_1}$ et, par suite, que l'égalité des rendements conduit à la formule classique

$$\eta = \sqrt{\frac{p}{p + p_1}},$$

Ce raisonnement n'est pas rigoureux ici, par suite de cette particularité que la puissance correspondant aux pertes est fournie mécaniquement ⁽¹⁾.

» 2. *Égalité des pertes dans les deux machines.* — La seconde

⁽¹⁾ On pourrait d'ailleurs aussi bien prendre l'expression $\frac{p - p_1}{p}$ pour le rendement global, ce qui conduirait à la formule

$$\eta = \sqrt{\frac{p - p_1}{p}}.$$

hypothèse, celle de l'égalité des pertes, conduit à

$$p = p' = \frac{p_1}{2}$$

et donne, pour les rendements de la génératrice et du moteur,

$$\eta = \frac{P}{P + \frac{p_1}{2}} = \frac{2P}{2P + p_1}$$

et

$$\eta' = \frac{P - \frac{p_1}{2}}{P} = \frac{2P - p_1}{2P}.$$

» La formule pour le moteur est ici la même que la formule commune, approximative toutefois, de l'hypothèse de l'égalité des rendements.

» L'hypothèse faite se confond ici naturellement avec celle de l'égalité des pertes pour le régime moyen.

» 3. *Égalité des pertes et des rendements pour le régime électrique commun.* — Le produit des rendements obtenus dans le cas de l'égalité des pertes pour le régime électrique P donne

$$\eta\eta' = \frac{2P - p_1}{2P + p_1}.$$

» Nous obtenons donc, en supposant les rendements égaux, la formule

$$\eta = \sqrt{\frac{2P - p_1}{2P + p_1}}.$$

» On remarquera encore que cette formule se déduit de la formule

$$\eta = \sqrt{\frac{P}{P + p_1}}$$

en retranchant du numérateur et du dénominateur de $\frac{P}{P + p_1}$ la moitié des pertes totales, ce qui éloignera cette fraction de l'unité et, par suite aussi, sa racine carrée. Elle donnera donc des valeurs plus faibles que $\sqrt{\frac{P}{P + p_1}}$.

» Si nous classons enfin les différentes formules obtenues, nous obtenons d'abord la suite décroissante

$$\sqrt{\frac{P}{P+p_1}} > \frac{2P}{2P+p_1} > \sqrt{\frac{2P-p_1}{2P+p_1}} > \frac{2P-p_1}{2P}.$$

» Il reste à intercaler dans cette suite les valeurs réelles de η et η' en supposant qu'on a, comme nous l'avons dit plus haut,

$$\frac{p'}{p} > \eta > \eta'.$$

» Il est facile de vérifier que la classification se fait de la manière suivante ⁽¹⁾ :

$$\sqrt{\frac{P}{P+p_1}} > \frac{2P}{2P+p_1} > \eta > \sqrt{\frac{2P-p_1}{2P+p_1}} > \eta' > \frac{2P-p_1}{2P}.$$

⁽¹⁾ Considérons d'abord par exemple l'inégalité

$$\frac{P}{P+p} > \sqrt{\frac{2P-p_1}{2P+p_1}}.$$

Élevons au carré les deux membres, on a

$$P^2(2P+p_1) > (P+p)^2(2P-p_1),$$

qu'on écrit :

$$p_1(2P^2+2Pp+p^2) > 2(2P+p)Pp,$$

ou

$$\frac{p_1}{p} > \frac{2P(2P+p)}{2P^2+2Pp+p^2}.$$

Mais l'inégalité

$$\frac{p_1}{p} > \frac{P}{P+p}$$

peut s'écrire

$$\frac{p'}{p} + 1 > \frac{P}{P+p} + 1$$

ou

$$\frac{p_1}{p} > \frac{2P+p}{P+p}.$$

Si donc nous remplaçons $\frac{p_1}{p}$ par la quantité plus petite $\frac{2P+p}{P+p}$ dans (1), cette dernière sera satisfaite *a fortiori* si la suivante l'est :

$$\frac{2P+p}{P+p} > \frac{2P(2P+p)}{2P^2+2Pp+p^2}.$$

Or celle-ci se réduit à

$$2P^2+2Pp+p^2 > 2P(P+p)$$

» On arrive donc à ce résultat intéressant que c'est ici la formule $\sqrt{\frac{2P - p_1}{2P + p_1}}$, établie en somme sans grande rigueur, qui est comprise pratiquement entre les rendements réels de la génératrice et du moteur ⁽¹⁾.

» La formule en $\sqrt{\frac{P}{P + p_1}}$ donne les résultats les moins exacts, mais elle est approchée par excès.

» II. MESURE DU RENDEMENT EN FONCTION DE LA CHARGE. — Les méthodes examinées jusqu'ici ne donnent de résultats suffisamment approchés, tout au moins pour celles de la première série, que si, avons-nous dit, le rendement est voisin de son maximum et le régime moyen sensiblement égal au régime normal ⁽²⁾.

» Les méthodes composées qui nous restent à considérer permettent l'étude de la variation du rendement avec la charge. Leur

ou

$$p^2 > 0.$$

La seconde inégalité

$$\sqrt{\frac{2P' - p_1}{2P' + p_1}} > \tau_1'$$

n'est en réalité exacte que dans les limites de la pratique.

Évidente pour le cas limite où $\frac{P'}{P} = 1$, puisque alors

$$\tau_1 \tau_1' = \sqrt{\frac{2P - p_1}{2P + p_1}},$$

elle est fautive pour le second cas limite

$$\frac{P'}{P} = \tau_1 = \tau_1'.$$

Toutefois, comme les pertes p et p' ont une partie commune importante, $\frac{P'}{P}$ est toujours assez éloigné de τ_1 pour que l'inégalité en question soit satisfaite tant qu'on ne dépasse pas exagérément le régime normal ou que la machine n'a pas son induit par trop saturé.

⁽¹⁾ Avec l'hypothèse $\tau_1' > \tau_1$ qui entraîne $\tau_1 > \frac{P'}{P}$, τ_1 et τ_1' sont simplement interchangés, la conclusion reste donc la même.

⁽²⁾ Des perfectionnements à ces méthodes ont été indiqués par divers auteurs et en particulier par notre collègue M. F. Loppé. Ils consistent à utiliser la méthode des pertes séparées en la complétant par une répartition équitable, entre les deux dynamos, des pertes complémentaires totales que fournissent les méthodes directes.

principe commun est de faire fonctionner les deux machines dans les mêmes conditions d'induction.

» *a. Méthode de Blondel.* — Elle est, comme on le sait, la réunion de la méthode d'Hopkinson et de celle de Potier (fig. 7).

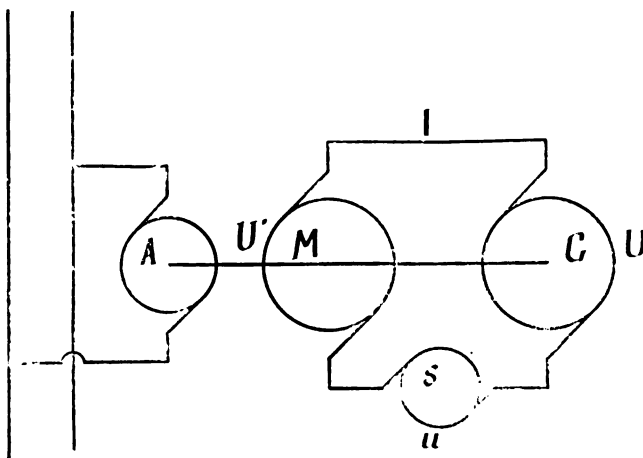


Fig. 7. — Schéma réduit de la méthode de Blondel.

» Soient U la tension de la génératrice, u celle du survolteur, I le courant commun et r la résistance d'induit. Les excitations sont supposées séparées.

» La force électromotrice réellement induite, c'est-à-dire correspondant au flux utile, est pour la génératrice

$$U + rI$$

et pour le moteur

$$U + u - rI;$$

l'égalité de ces forces électromotrices exige donc qu'on ait

$$U + rI = U + u - rI,$$

ou

$$u = 2rI,$$

et

$$uI = 2rI^2.$$

» Le survolteur devra donc fournir les pertes par effet Joule et, par suite, le moteur auxiliaire, les autres pertes : frottement, ventilation, hystérésis et courants de Foucault.

» La souplesse de la méthode est unique, le réglage de la vitesse

et celui du débit se faisant d'une façon complètement indépendante l'une de l'autre.

» Ajoutons que l'égalité des forces électromotrices réelles entraîne celle des excitations si le décalage des balais est le même sur les deux dynamos. Le réglage des excitations fait à vide a néanmoins besoin d'être modifié en charge si l'on veut maintenir une des tensions constante en charge.

» L'unique défaut est l'évaluation de la puissance p_1 fournie par le moteur auxiliaire aux arbres des deux dynamos. D'ailleurs, une faible erreur sur p_1 n'entraîne qu'une erreur insignifiante sur le rendement. C'est pourquoi cette méthode est de beaucoup la plus recommandable.

» La seule hypothèse à appliquer ici est naturellement celle de l'égalité des pertes dans les deux machines, base de la méthode. Ces pertes sont au total $p_1 + uI$; les rendements sont donc

$$\eta = \frac{UI}{UI + \frac{p_1 + uI}{2}} = \frac{2UI}{(2U + u)I + p_1}$$

pour la génératrice et

$$\eta' = \frac{(U + u)I - \frac{p_1 + uI}{2}}{(U + u)I} = \frac{(2U + u)I - p_1}{2(U + u)I}$$

pour le moteur.

» Ces formules peuvent être mises sous une forme plus pratique en posant $U + u = U'$ comme précédemment et en introduisant seulement le rapport des tensions aux bornes.

» Nous obtenons ainsi

$$\eta = \frac{2}{1 + \frac{U'}{U} + \frac{p_1}{UI}},$$

$$\eta = \frac{1 + \frac{U}{U'} - \frac{p_1}{U'I}}{2}.$$

» On pourra introduire dans le terme p_1 , pour chaque formule, la valeur correspondante des pertes par excitation ⁽¹⁾.

⁽¹⁾ On choisit évidemment pour U ou U' la tension normale suivant qu'on étudie des génératrices ou des moteurs.

» *b. Méthode d'Hutchinson.* — C'est une combinaison des méthodes de Lord Rayleigh et de Potier. Suivant que la génératrice ou le moteur sont en dérivation directe sur le réseau, on a un montage différent. Le second montage est celui indiqué par Hut-

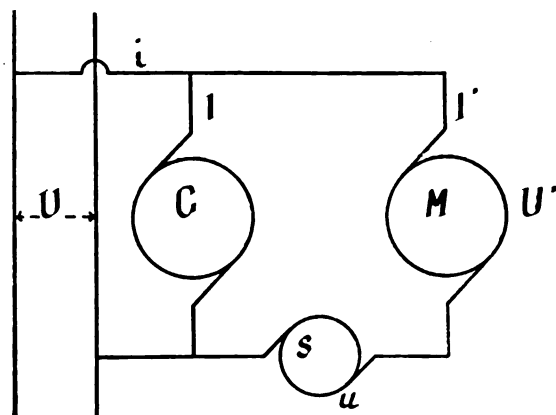


Fig. 8. — Schéma réduit de la méthode de Hutchinson.

chinson; nous lui préférons, au point de vue expérimental, le premier, que nous avons indiqué nous-mêmes, et que nous considérerons seul ici (*fig. 8*).

» Adoptons les mêmes notations que dans la méthode précé-

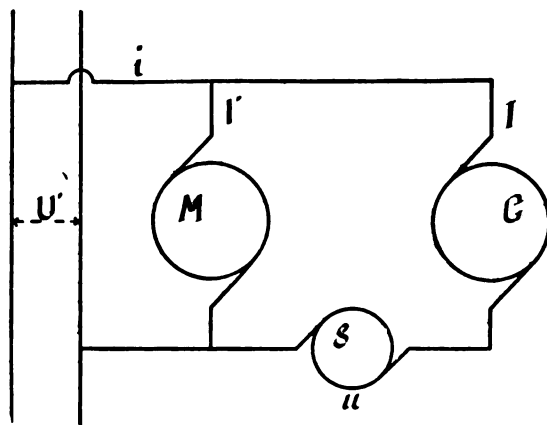


Fig. 9. — Schéma réduit de la méthode de Hutchinson, modifié par l'auteur.

dente et soit de plus i le courant fourni par le réseau ou une source à la tension de la génératrice.

» Les forces électromotrices réellement induites dans la géné-

ratrice et le moteur sont ici :

$$U + rI \quad \text{et} \quad U + u - r(I + i).$$

» Leur égalité conduit à

$$U + rI = U + u - r(I + i)$$

ou

$$u = rI + r(I + i).$$

» Le survolteur fournit donc une tension égale à la *chute ohmique* dans les deux enroulements, mais sa *puissance* débitée, uI , ne correspond pas à la totalité des pertes par effet Joule dans les deux enroulements, ou

$$rI^2 + r(I + i)^2.$$

» Le réseau fournit donc non seulement les pertes autres que celles par effet Joule, mais aussi une partie de celles-ci, ou

$$rI^2 + r(I + i)^2 - [rI + r(I + i)]I = r(I + i)i.$$

» Le réglage de la vitesse se fait à vide ($u = 0$), mais l'indépendance des deux moyens de réglage est moins grande que dans la méthode de M. Blondel ⁽¹⁾.

» Les excitations sont encore ici égales si les décalages le sont sensiblement, celui du moteur un peu plus faible que celui de la génératrice.

» Les formules du rendement sont assez longues à établir en partant des puissances fournies par les deux sources et en partageant la tension u proportionnellement aux courants I et $I + i$.

» On arrive très rapidement au résultat en opérant par un artifice indiqué par M. Blondel ⁽²⁾ et consistant à passer par les puissances électromagnétiques, c'est-à-dire en considérant les forces électromotrices induites réelles, ce qui dispense de mettre en évidence les effets Joule.

» Soient P la puissance mécanique sur l'arbre commun et p ,

⁽¹⁾ Une modification de la méthode Hutchinson a été indiquée par Clinton qui emploie deux survolteurs fournissant : l'un la puissance perdue par effet Joule dans le moteur, l'autre celle perdue dans la génératrice.

⁽²⁾ A. BLONDEL et P. DUBOIS, *La traction électrique*.

les pertes par machine, autres que les effets Joule, et, par suite, égales pour les deux dynamos.

» On a, en désignant par E la force électromotrice réelle commune,

$$E = U + rI = U + u - r(I + i).$$

» Or le moteur donne

$$E(I + i) = P + p_1$$

et la génératrice

$$P = EI + p_1;$$

d'où, en éliminant p_1 ,

$$P = \frac{E(2I + i)}{2}.$$

» Le rendement de la génératrice est donc

$$\eta = \frac{PI}{P} = \frac{2II}{E(2I + i)} = \frac{2II}{(U + rI)(2I + i)}.$$

» On peut mettre cette formule sous une forme plus commode en remarquant que la relation

$$u = rI + r(I + i) = r(2I + i)$$

fournit une valeur de la résistance r en fonction des données de l'expérience, c'est-à-dire en ordre de marche.

» En remplaçant donc $r(2I + i)$ par u , on a

$$\eta = \frac{2II}{I(2I + i) + uI} = \frac{2II}{2II + Ui + uI}.$$

» Cette formule montre que les pertes dans la génératrice sont $\frac{Ui + uI}{2}$, c'est-à-dire la demi-somme des puissances fournies par les deux sources diminuées de ui :

$$Ui + u(I + i) - ui.$$

» Introduisons enfin les valeurs des tensions et des courants dans les deux machines, U , U' , I et I' , nous aurons

$$\eta = \frac{2II}{2II + I(I - I') + (U' - U)I} = \frac{2II}{U'I + UI}$$

ou

$$\eta = \frac{2}{\frac{U'}{U} + \frac{I'}{I}}.$$

» Si l'on veut tenir compte directement de l'excitation I_e faite sous la tension U , on a

$$\eta = \frac{2}{\frac{U'}{U} + \frac{I'}{I} + \frac{I_e}{I}}.$$

» De même, avec le moteur, on aurait

$$\eta' = \frac{P}{(U+u)(I+i)} = \frac{E(2I+i)}{2(U+u)(I+i)} = \frac{[(U+u) - r(I+i)](2I+i)}{2(U+u)(I+i)}$$

et, en remplaçant $r(2I+i)$ par u ,

$$\eta = \frac{2(U+u)(I+i) - (U+u)i - u(I+i)}{2(U+u)(I+i)}.$$

» Les pertes sont ici

$$\frac{(U+u)i + u(I+i)}{2},$$

c'est-à-dire la demi-somme des puissances fournies par les deux sources augmentées de ui .

» Enfin, avec les valeurs des tensions et des courants dans les deux machines, on peut écrire

$$\eta' = \frac{U'I + UI'}{2U'I'}$$

ou

$$\eta' = \frac{1}{2} \left(\frac{U}{U'} + \frac{I}{I'} \right).$$

» Avec un moteur shunt ou à excitation séparée de valeur I_e et faite sous la tension U' on aurait

$$\eta' = \frac{1}{2} \left(\frac{U}{U'} + \frac{I}{I'} - \frac{I_e}{I'} \right).$$

» Cette dernière formule, sous sa forme particulière, peut être généralisée également pour le cas d'un moteur série, lorsqu'on tient compte directement des pertes dans l'enroulement inducteur.

Il faut alors mettre le survolteur entre les deux inducteurs, de résistance R chacun, suivant le schéma indiqué (fig. 10).

» On obtient alors par un calcul analogue la formule

$$\eta' = \frac{1}{2} \left[\frac{U}{U'} + \frac{I}{I'} + \frac{RI'}{U'} \left(1 + \frac{I}{I'} \right) \right].$$

» Le rendement de la génératrice série serait de même

$$\eta = \frac{2}{\frac{U'}{U} + \frac{I'}{I} - \frac{RI'}{U} \left(\frac{I'}{I} - 1 \right)}.$$

» Quoique ces formules soient rigoureuses, on a employé une formule unique pour les deux expressions.

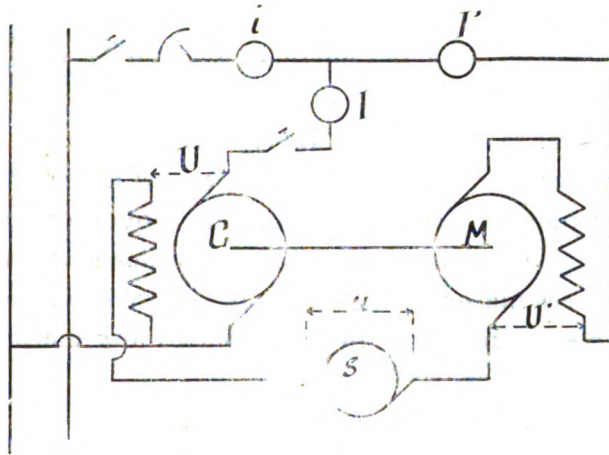


Fig. 10. — Schéma de la méthode de Hutchinson pour moteurs de tramways, modifié par l'auteur.

» Si nous reprenons les expressions de η et η' en fonctions de U , I , u et i , on reconnaît facilement que le dénominateur de η' est le même que le numérateur de η , de sorte que le produit donne

$$\eta\eta' = \frac{UI}{(U+u)(I+i)} = \frac{UI}{U'I'},$$

résultat évidemment intuitif.

» En supposant les rendements égaux, on obtient alors

$$\eta = \eta' = \sqrt{\frac{U}{U+u} \frac{I}{I+i}} = \sqrt{\frac{U}{U'} \frac{I}{I'}},$$

valeur comprise entre les deux valeurs exactes.

» Telles sont les quelques remarques que je voulais vous présenter. J'y ai introduit toutes les formules que j'ai vu employer, avec les méthodes considérées, ainsi que les formes particulières que j'ai personnellement adoptées pour faciliter leur application en pratique avec la plus grande exactitude possible.

» Si quelques-uns de nos collègues ont connaissance d'autres formules que celles que je viens d'indiquer, je serais très heureux de les leur voir communiquer.

» J'espère que ces notes, sur un sujet sans prétention et qui paraissait épuisé, vous ont néanmoins intéressés et je vous remercie tout particulièrement de la bienveillante attention que vous avez bien voulu m'accorder. »

M. le PRÉSIDENT. — « Je remercie vivement M. Guilbert de son intéressante Communication. Les questions de rendement ont une grande importance pratique; l'analyse très complète qu'il vient de nous exposer montre bien dans quels sens différents sont couramment employées des expressions identiques et jusqu'à quel point il était utile de faire un exposé critique des éléments envisagés dans les diverses méthodes en usage. Je félicite également M. Guilbert des perfectionnements qu'il a apportés aux méthodes et formules antérieurement usitées. »

La Communication faite à la suite, au cours de cette même séance, par M. L. CAHEN, *Sur les lignes et appareils téléphoniques*, sera publiée dans le prochain numéro du *Bulletin mensuel*.

La séance est levée à 18 h 50 m.

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES.

Calcul de matériel roulant pour tramways électriques par H. E. O'BRIEN

(*Am. Inst. Elect. Eng.*, avril 1914).

L'auteur traite la question des faibles réductions de poids dans le matériel roulant électrique et considère leur influence sur les frais d'entretien. La nécessité du confort, pour les voitures, ne doit pas être perdue de vue; mais il faut admettre que la légèreté des voitures n'est pas incompatible avec leur confort. La légèreté de construction peut être obtenue soit en réduisant les divers éléments, ce qui a pour inconvénient de réduire le facteur de sécurité, soit en employant des matériaux plus légers ou des matériaux d'une résistance intrinsèque supérieure, de manière à réaliser une réduction de poids des éléments sans compromettre la solidité de l'ensemble. D'ailleurs, certains matériaux à la fois très légers et très résistants sont encore d'un prix fort élevé.

L'auteur montre que chaque tonne de poids économisé représente (en admettant le taux de 10 pour 100 pour l'intérêt et l'amortissement du capital) une économie totale annuelle d'environ £ 25.5 (637.50 fr) par tonne de voiture motrice, et d'environ £ 19 (475 fr) par tonne de voiture remorquée.

Il est alors d'une logique commerciale de consentir une dépense de £ 185 (4625 fr) par voiture motrice et £ 145 (3625 fr) par remorque, afin d'économiser le poids d'une tonne.

Viennent ensuite en discussion les divers modes d'économie du poids. Des Tables annexées au Mémoire donnent les détails numériques relatifs aux voitures motrices et aux remorques en usage parmi les principales Compagnies de tramways électriques de l'Angleterre et des États-Unis.

DISCUSSION DE LA COMMUNICATION PRÉCÉDENTE.

Au cours de la discussion, M. W. Casson émet l'avis que la considération du poids par rapport à l'entretien, même pour un poids judicieusement réparti, pourrait disparaître complètement devant d'autres considérations, si menues soient-elles. — M. J. B. Sparks observe que si l'auteur a admis que les dépenses d'énergie, de réparations, d'entretien, etc. variaient au prorata du poids de la voiture, lui est d'avis que ces dépenses se sauraient varier dans une telle proportion, et que les frais par tonne augmenteraient même en certains cas de réduction du poids total. De plus, il croit pouvoir soutenir que tous les types de matériel roulant électrique ont fortement augmenté de poids depuis les débuts de la traction électrique, le fait ayant été constaté qu'au matériel le plus robuste, obtenu par augmentation du poids, correspondait une réduction d'entretien. — M. S. P. Smith souhaiterait qu'il y eût plus d'élasticité dans la méthode de contrôle de la vitesse, ce qui permettrait de mieux remplir les diverses conditions du service. Aujourd'hui la méthode type consiste dans le contrôle par séries parallèles et dans l'arrêt rapide du train en pleine vitesse. Cela est sans doute assez préjudiciable à l'équipement, mais tant que l'on sera limité à cette méthode de contrôle, il ne sera guère possible d'éviter l'écueil.

Lampes électriques portatives, pour mines, par H. O. SWOBODA (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, avril 1914).

L'auteur rappelle l'encouragement que rencontre l'invention des lampes électriques de mine parmi divers gouvernements. Il résume les caractères essentiels d'une bonne lampe aux points de vue de la sécurité, de la qualité et de la constance de la lumière, enfin, de l'obstacle aux fausses manœuvres. Il trouve prétexte à élucider ces divers points en présentant la lampe « Ceag », lauréate du prix offert par le *Home Office* de Grande-Bretagne en 1912. Il explique aussi comment les lampes sont plus ou moins bien traitées en ordre de service, et il examine la question des bancs de charge et de la salle des accumulateurs. D'après l'expérience acquise en Angleterre, le nombre de lampes trouvées en défaut, par journée de travail, est moindre de 1 pour 100. La durée des électrodes varie de 100 à 400 journées; celle des lampes est d'environ 1000 heures. La nécessité capitale est d'un appareil complémentaire indiquant la présence des gaz inflammables, comme dans les lampes de Davy. Cette condition semble être réalisée par le « sifflet avertisseur de gaz de mine » système Haber, mis en expérience par le Gouvernement allemand.

Moteurs à courant continu pour ponts transbordeurs de charbon ou de minéral, par R. H. Mc LAIN (*Amer. Elect. Inst. Eng.*, juin 1914).

Ce Mémoire donne une brève description du dispositif mécanique que comporte un pont transbordeur de houille. Celui-ci consiste essentiellement en une voiture à trolley combinée avec un mécanisme de levage agissant sur un auget à remplissage automatique. L'auteur recommande l'emploi, pour actionner la voiture à trolley, d'un moteur à enroulement série, et il indique la manière d'utiliser celui-ci en vue des meilleurs résultats économiques. D'autre part, il recommande, pour le levage à faible vitesse, un moteur à enroulement série et, pour le levage à grande vitesse, un moteur à enroulement shunt. Les avantages respectifs des deux méthodes d'enroulement sont pris en considération.

Avantages d'un point neutre à la terre dans les systèmes de distribution, par J. P. JOLLYMAN, P. M. DOWNING, et F. G. BAUM (*Amer. Elect. Inst. Eng.*, mai 1914).

Il s'agit d'une description des méthodes adoptées par *The Pacific Gas and Electric Co.*, de Californie, où les auteurs estiment que le système du point neutre à la terre présente des avantages en ce qui concerne les transformateurs, la ligne de distribution et la continuité du service. La tension maximum sur les isolateurs de ligne, en pareil cas, ne dépasse jamais 57,7 pour 100 de la tension composée, et il est possible de conserver le service polyphasé à la station centrale, sur une ligne de branchement, avec deux fils seulement, si l'un est coupé. Cela est impossible dans le système triangle, à moins qu'il y ait une phase à la terre. D'une manière générale, on peut affirmer que les risques de dérangement sont réduits, et il est à présumer qu'il y a moins de trouble à attendre des téléphones et des télégraphes.

Étude de quelques systèmes triphasés, par C. FORTESCUE (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, mai 1914).

Cette étude est une contribution à la controverse de l'étoile et du triangle. Il existe quatre combinaisons de ligne de distribution et de transformateurs, selon que ligne ou

transformateurs sont reliés en étoile ou en triangle. Ces quatre combinaisons sont examinées tour à tour. L'auteur conclut que, pour les tensions de distribution inférieures à 44 000 volts, des transformateurs avec secondaires reliés soit en étoile, soit en triangle, peuvent être également employés, le couplage en triangle ayant toutefois de légers avantages vu sa flexibilité plus grande. Pour les tensions de distribution dépassant cette limite, les transformateurs à secondaires couplés en étoile doivent être préférés. D'amples développements accompagnent les conclusions de l'auteur, non sans examen complet de tous les autres cas envisagés.

Quelques observations relatives à la traction électrique sur les chemins de fer,
par l'ing. E. GRISMAYER (*Elettrotecnica*, 25 octobre, 15 et 25 novembre 1914).

L'auteur expose, d'abord, les résultats obtenus par les dernières applications de la traction électrique aux chemins de fer; ensuite, par des comparaisons entre les différents systèmes que l'on préconise, il arrive à établir lequel de ces systèmes peut convenir le mieux aux exigences toujours plus nombreuses et plus complexes qui découlent du tracé et des besoins d'exploitation d'une ligne de chemin de fer.

Dans son premier Chapitre, il traite seulement du système triphasé qui est presque exclusivement réservé en Italie aux chemins de fer de l'État.

Il s'occupe, ensuite, en détail de l'installation effectuée dernièrement pour l'exploitation très importante du tunnel des Giovi sur la ligne Gênes-Alexandrie-Turin.

L'auteur explique quelles sont les raisons d'ordre technique qui ont fait choisir le système triphasé. Ce choix a été fixé à la suite de résultats obtenus dans les installations antérieures, faites en Italie, d'après les exigences particulières qu'offrent spécialement le tracé et l'exploitation de la ligne des Giovi et parmi lesquelles il y a lieu de remarquer celle de la double traction avec machine en tête et machine en queue.

Après avoir résumé les caractéristiques fondamentales de l'installation et du matériel employé, il expose les résultats techniques et économiques obtenus et fait ressortir la grande augmentation de la capacité atteinte par l'ancienne ligne des Giovi en conséquence de son électrification.

Il examine d'une façon particulière le groupe locomoteur 040 type E (à cinq essieux, couplés) qui assure entièrement le service électrique de la ligne en question. Cet examen est fait au point de vue électrique et mécanique de la stabilité de marche, prenant en considération et discutant les théories modernes sur les mouvements perturbateurs auxquels sont soumises les machines en marche, les locomoteurs électriques, en général, et ceux du groupe 030 des Giovi, en particulier.

L'auteur s'occupe ensuite d'autres applications plus récentes, ou en cours d'exécution de la traction électrique aux chemins de fer italiens; il donne en résumé les caractéristiques techniques du brevet Milch qui se retrouvent sur quelques-unes des nouvelles locomotives des chemins de fer de l'État italien et qui permettent d'augmenter le nombre des vitesses économiques d'un locomoteur triphasé, au moyen de la transformation d'un moteur triphasé à $8n$ pôles en moteur diphasé à $6n$ pôles et, cela, sans complications, ni difficultés pour l'exploitation.

Enfin, il expose dans quels cas et pour quelles applications le système triphasé présente les avantages qui le font indiscutablement préférer à tout autre système pour les chemins de fer.



BIBLIOGRAPHIE.

Guide juridique et administratif des entrepreneurs de distribution d'énergie électrique (2^e édition), par Ch. SIREY. Paris, au Syndicat professionnel des Usines d'électricité, 1914; 1 vol.

On sait que la loi du 15 juin 1906 sur les distributions d'énergie électrique, ne tranchait pas elle-même les difficultés d'application qu'elle soulevait et qu'elle laissait ce soin délicat à des règlements d'administration publique.

Ces documents fort nombreux, augmentés des décisions de jurisprudence qui en ont fixé l'interprétation, ont été coordonnés et réunis dans le présent Ouvrage de M. Ch. Sirey, avocat à la Cour d'appel de Paris. L'auteur les a fait suivre d'un instructif Commentaire sous forme de guide juridique et méthodique de la loi et des règlements successifs qu'elle a rendu nécessaires.

Ce Commentaire est augmenté, dans la nouvelle édition, de nombreuses citations de jurisprudence concernant l'exploitation des usines électriques et les rapports des exploitants avec l'Administration, les abonnés et les tiers.

La téléphonie et les autres moyens d'intercommunication dans l'industrie, les mines et les chemins de fer, par P. MAURER. Paris, Dunod et Pinat, 1914; 1 vol.

L'auteur a spécialement groupé, dans ce travail, les différents moyens utilisés soit pour établir des intercommunications entre un ou plusieurs points déterminés, soit pour permettre la transmission d'indications ou de signaux conventionnels à un ou plusieurs postes d'action avec enregistrement ou simplement par permanence des communications transmises; il lui a donné le caractère pratique convenable en se bornant à une étude succincte du fonctionnement théorique des organes et à une description des appareils, pour s'étendre davantage sur les montages pratiquement réalisables dans les divers cas d'application à l'industrie en général, aux mines et aux chemins de fer.

A cet effet, il a mis, à l'appui de son texte, un grand nombre de schémas d'installation détaillés, mais très *parlants* et faciles à suivre.

Il convient de signaler, notamment, le Chapitre affecté aux téléphones automatiques, lesquels sont appelés à résoudre l'un des plus intéressants problèmes que soulève l'échange rapide et sûr des communications téléphoniques.

IL Y A TRENTE ANS.

Mai 1885. — Récepteur téléphonique Boisselot, par M. J. BOISSELOT. — Auto-accumulateur, par M. J. JABLOCHKOFF. — La lampe Cruto, par M. E. DESROZIERS. — Galvanomètre à cadre curviligne, par M. A. GAFFE. — La téléphonie, par M. L. MAICHE.

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ INTERNATIONALE
DES
ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Compte rendu de la réunion mensuelle du 3 juin 1915 : Admission de Membre titulaire, p. 197. — Membre décédé, p. 198. -- Sur une forme avantageuse de bobine d'électro-aimant (M. **A. Perot**), p. 199.
Sur les lignes et appareils téléphoniques (M. **L. Cahen**), p. 209 — Observation (M. **P. Janet**), p. 236.
RESUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES, p. 238.
BIBLIOGRAPHIE, p. 240.
IL Y A 30 ANS, p. 240.

COMPTE RENDU
DE LA
RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du jeudi 3 juin 1915 ⁽¹⁾.

PRÉSIDENCE DE M. BRYLINSKI.

La séance est ouverte à 17 h 35 m.

Le procès-verbal de la dernière réunion mensuelle est adopté.

Est élu membre titulaire de la Société internationale des Électriciens :

M. **Delaval** (Léon-Jules), Ingénieur électricien, Westinghouse Electric and Manufac-

⁽¹⁾ La Société n'est pas solidaire des questions émises par ses Membres dans les discussions, n'est responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

turing Co. East Pittsburg Pa., 634, Peebles St., Welkinsburg, Pennsylvania, U. S. A.
— Présenté par MM. Leblanc et P. Janet.

M. le PRÉSIDENT fait part du décès de M. *Herrmann* (Maximiliano) et en exprime les regrets de la Société.

L'ordre du jour appelle les Communications techniques.

SUR UNE FORME AVANTAGEUSE DE BOBINE D'ÉLECTRO-AIMANT.

M. A. PEROT. — « Dans les recherches récentes que M. H. Deslandres et moi-même avons exécutées sur la production des champs magnétiques élevés, nous avons été amenés à donner une part prépondérante à la force magnétique de la bobine magnétisante propre. On sait en effet que, lorsque l'on cherche à produire un champ élevé en magnétisant un circuit magnétique formé par une masse de fer, présentant une coupure convenablement aménagée, il est difficile, si l'action propre de la bobine sur l'entrefer n'intervient pas directement, de dépasser 50000 gauss dans l'entrefer, par suite de la saturation magnétique des pièces polaires qui, lorsque leur magnétisation est élevée, n'assurent plus, dans de bonnes conditions, la concentration du flux dans l'entrefer.

» D'autre part, les études de M. Ch. Fabry ont porté sur la production des champs par une bobine seule, sans que d'ailleurs, dans ces recherches très intéressantes, M. Fabry ait précisé le mode de refroidissement à utiliser pour enlever la chaleur dégagée par le passage du courant et ait abordé le problème proprement dit de la réalisation de semblables bobines.

» M. Deslandres et moi avons pensé qu'il était intéressant de permettre aux lignes de force produites par une bobine de se fermer dans un milieu à perméabilité élevée, de façon à réduire la résistance du circuit magnétique. Dans la production de champs très élevés, les cornes polaires que l'on est tenté de placer dans l'entrefer n'ont pour ainsi dire pas d'effet, parce que la perméabilité est petite, mais si l'on peut offrir aux lignes de force un chemin dans une masse de fer où la perméabilité soit élevée, dans la région des faces terminales de la bobine et sur tout son pourtour, il est bien évident que le flux sera augmenté. On arrive ainsi à la conception d'un électro-aimant dans lequel le fer serait extérieur à la bobine et n'aurait nullement le rôle de rassembler le flux magnétique dans l'entrefer.

» Mais il faut que la bobine soit extrêmement puissante et permette de concentrer les ampères-tours dans un volume restreint; il faut, par suite, enlever rapidement la quantité de chaleur dégagée. Aussi avons-nous, dans nos derniers appareils, constitué le conducteur par un ruban d'argent mince enroulé sur lui-même et dont les différentes spires sont séparées par des cales de fibre rouge, de manière à permettre la circulation d'un liquide dans le sens de l'axe de la bobine. Le liquide utilisé d'abord était le pétrole refroidi; dans nos dernières expériences nous avons employé l'eau ordinaire qui nous a donné d'excellents résultats.

» L'étude des différentes formes de bobines a montré que l'une des plus avantageuses était la forme dite *trapézoïdale*, dont la méridienne est un trapèze isocèle dont les côtés non parallèles se rencontrent au centre O de la bobine. Le métal est de même épaisseur partout; il résulte de ce fait que la résistance de toutes

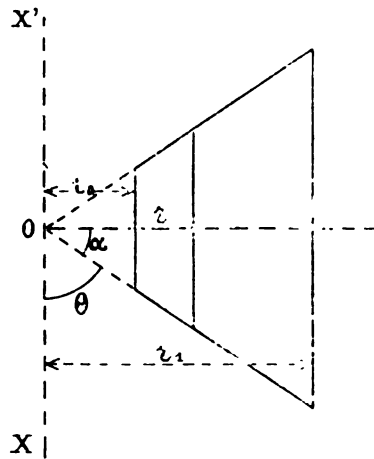


Fig. 1.

les spires est la même, en effet si r est le rayon d'une spire, e l'épaisseur du métal, α le demi-angle des côtés non parallèles et ρ la résistivité, la résistance de cette spire est

$$\frac{2\pi r}{2r \tan \alpha \times e} \rho = \frac{\pi \rho}{e \tan \alpha},$$

indépendante de r ; la quantité de chaleur dégagée par le passage du courant est donc la même pour toutes les spires, et la quantité

de liquide refroidissant chaque spire est la même aussi, car dans les espaces capillaires de 0,3 mm d'épaisseur laissés entre les spires, l'écoulement se fait vraisemblablement suivant la loi de Poiseuille, et si la section du conduit est proportionnelle au rayon r , la longueur de ce conduit est, elle aussi, proportionnelle à r , de telle sorte que le volume d'eau débité par chaque canal annulaire est constant, tout comme la quantité de chaleur à enlever.

» La force magnétique produite en son centre par une telle bobine s'obtient immédiatement; il suffit de remarquer que deux spires quelconques forment des systèmes géométriquement semblables dont le rapport de similitude est celui des rayons; les forces magnétiques produites par des courants égaux parcourant les deux spires sont donc en raison inverse de ce rapport, c'est-à-dire des rayons.

» Soit donc h_0 la force produite au centre par la première spire de rayon r_0 , celle que produit la spire de rayon r sera

$$h = h_0 \frac{r_0}{r};$$

si ηe est la distance d'axe en axe de deux spires voisines, et δr la variation du rayon en passant d'une spire à l'autre, on aura

$$\frac{\delta r}{\eta e} = 1,$$

et l'on pourra écrire

$$h = \frac{h_0 r_0}{\eta e} \frac{\delta r}{r},$$

la force totale sera

$$H = \sum_{r_0}^{r_1} \frac{h_0 r_0}{\eta e} \frac{\delta r}{r}.$$

» Ou en passant aux infiniment petits, ce qui est légitime dans le cas qui nous occupe,

$$H = \int_{r_0}^{r_1} \frac{h_0 r_0}{\eta e} \frac{dr}{r} = \frac{h_0 r_0}{\eta e} L \frac{r_1}{r_0}.$$

» Pour obtenir h_0 , il suffit d'appliquer la formule classique de la bobine à une couche composée de n tours de fil par centimètre

de longueur, le courant dans chaque conducteur étant i ,

$$h_0 = 4\pi ni \cos \theta = 4\pi ni \sin \alpha;$$

ici $2r_0 \tan \alpha$ est la longueur de la bobine, si I est le courant dans la lame,

$$I = 2r_0 \tan \alpha ni$$

et

$$h_0 = \frac{4\pi I \sin \alpha}{2r_0 \tan \alpha} = \frac{2\pi I \cos \alpha}{r_0}.$$

On a alors

$$(1) \quad H = \frac{2\pi I \cos \alpha}{\eta e} L \frac{r_1}{r_0}.$$

» Il est intéressant de remarquer que la force magnétique croît avec $I \cos \alpha$; or pour une valeur donnée du creux, c'est-à-dire de r_0 , I est proportionnel à $\tan \alpha$, car on ne saurait dépasser une densité de courant donnée, δ par exemple, et l'on a

$$I = \delta \times e \times 2r_0 \tan \alpha.$$

» Si l'on introduit cette expression dans la valeur de H il vient

$$(2) \quad H = \frac{4\pi\delta}{\eta} r_0 \sin \alpha L \frac{r_1}{r_0},$$

et l'on voit que le champ croîtra avec l'angle α ; la bobine la plus avantageuse, correspondant à $\alpha = \frac{\pi}{2}$, est la bobine cylindrique indéfinie, mais alors l'intensité de courant serait infinie.

» Pour une valeur donnée de I il y a intérêt, d'après la formule (1), à donner à α la plus forte valeur possible, ce qui revient à dire qu'il faudra faire travailler la première spire à la densité maximum. α sera alors déterminé.

» La valeur de H croît avec le rapport $\frac{r_1}{r_0}$; on ne peut augmenter ce rapport sans limite à cause de l'énergie dépensée d'une part, et de la dimension des appareils de l'autre. Voici du reste les valeurs des logarithmes naturels de quelques nombres entiers montrant l'allure de cet accroissement :

$\frac{r_0}{r_1}$	3	4	5	6	7	8
$L \frac{r_0}{r_1}$	1,10	1,39	1,61	1,79	1,94	2,08
Accroissement p. 100.	26,4	15,8	11,2	8,4	7,2	

» On voit combien rapidement diminue l'accroissement relatif.

» Nous allons montrer d'ailleurs que des considérations économiques obligent à maintenir ce rapport à une valeur relativement basse.

» Cherchons en effet l'expression de l'énergie nécessaire pour entretenir ce courant I dans la bobine, et, à cet effet, puisque toutes les spires ont même résistance, cherchons la valeur du produit RI^2 pour une spire quelconque.

» On a

$$RI^2 = \frac{\pi \rho}{e \tan \alpha} I^2;$$

de l'équation (1) on tire

$$I = \frac{H \eta e}{2 \pi \cos \alpha L \frac{r_1}{r_0}},$$

d'où

$$RI^2 = \frac{\pi \rho}{e \tan \alpha} \frac{H^2 \eta^2 e^2}{4 \pi^2 \cos^2 \alpha \left(L \frac{r_1}{r_0} \right)^2} = \rho \frac{H^2}{2 \pi} \frac{\eta^2 e}{\sin 2 \alpha \left(L \frac{r_1}{r_0} \right)^2},$$

le nombre des spires est

$$N = \frac{r_1 - r_0}{\eta e},$$

on aura donc

$$(3) \quad W = NRI^2 = \frac{\rho H^2}{2 \pi} \frac{\eta}{\sin 2 \alpha} \frac{r_1 - r_0}{\left(L \frac{r_1}{r_0} \right)^2}.$$

» Cette expression montre que si l'on dispose d'une énergie donnée W , ce qui est le cas ordinairement réalisé, le champ H produit sera maximum avec $\sin 2 \alpha$, c'est-à-dire pour $\alpha = \frac{\pi}{4}$, et d'autant plus grand que l'expression $\frac{r_1 - r_0}{\left(L \frac{r_1}{r_0} \right)^2}$ sera plus petite.

Or cette expression passe par un minimum pour une valeur de $\frac{r_1}{r_0}$ voisine de 5, on a en effet :

$\frac{r_1}{r_0}$	2	3	4	5	6	7
$\frac{1}{r_0} \frac{r_1 - r_0}{\left(L \frac{r_1}{r_0} \right)^2}$	2,1	1,65	1,56	1,54	1,56	1,58

de sorte que l'on est amené à maintenir la valeur de $\frac{r_1}{r_0}$ entre 5 et 6.

» On doit d'ailleurs remarquer que e , épaisseur du métal, n'entre pas dans l'expression de W , seul le coefficient de foisonnement η

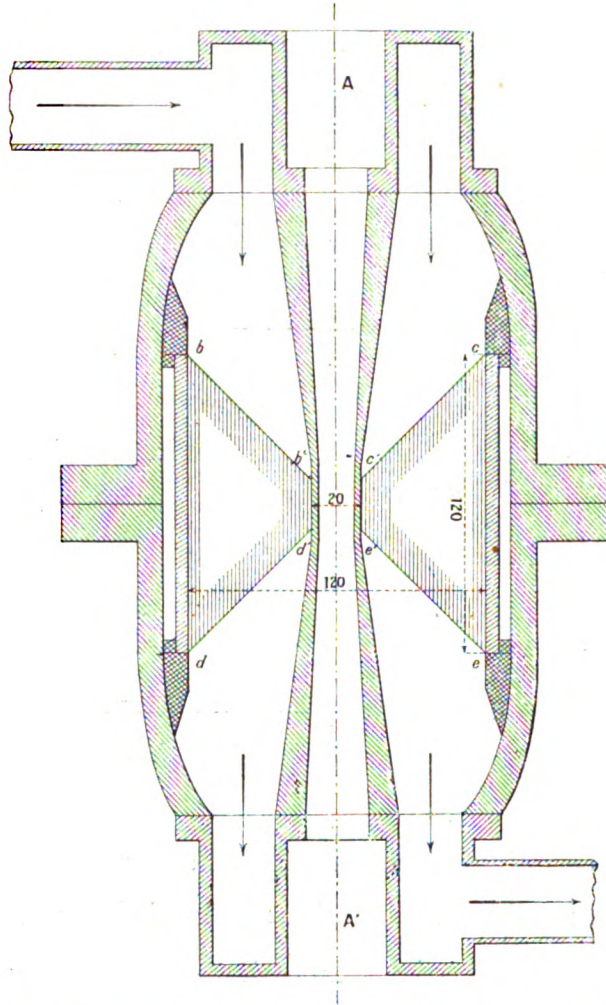


Fig. 2. — Coupe de l'appareil n° 4 suivant l'axe de la bobine.

bcb'c'ded'e', bobine trapézoïdale de 80 spires en argent vierge; les spires sont trop rapprochées pour être visibles individuellement; *fghi*, creux de la bobine. Les flèches indiquent les directions successives des filets d'eau qui traversent la bobine.

intervient, de sorte que l'on peut disposer de e de manière à atteindre sans la dépasser la densité limite dans la première spire.

» La bobine qui a été construite sur ces données et a été essayée, dans l'installation électrique des nouveaux magasins du Bon Marché

de Paris, avait les données suivantes :

$$r_0 = 1 \text{ cm}, \quad \frac{r_1}{r_0} = 6, \quad e = 0,3 \text{ mm}, \quad \eta = 2, \quad \alpha = \frac{\pi}{4}, \quad N = 80;$$

elle était en argent vierge fourni par la maison Caplain Saint-André de Paris.

» Elle est représentée par la figure ci-contre.

» Bien qu'au montage six spires se soient trouvées mises en court circuit, ce qui a considérablement abaissé la valeur du champ, car ces spires étaient voisines du centre, nous avons obtenu les résultats suivants :

Ampères.	Kilowatts approximatifs.	Champ en gauss.	Champ Ampères
1040	12,5	10 300	9,90
3150	126	29 800	9,75
4100	222	42 600	10,36
5000	340	49 900	10,00

» La constance du rapport des gauss aux ampères montre bien que pendant la durée de l'essai la bobine n'a pas subi d'altération. Dans la dernière expérience la densité s'est élevée à 830 ampères par millimètre carré dans la première spire et à 139 dans la dernière.

» Les mesures du champ ont été faites par l'observation photographique du phénomène de Zeeman sur les raies du zinc en direction longitudinale. Si la bobine n'avait pas eu d'accident, la dernière valeur, au lieu d'être 50 000 gauss, aurait été 64 000.

» Comparons maintenant ces résultats à ceux d'une bobine cylindrique absorbant le même nombre de watts. Pour cela il suffit de se reporter à la formule donnée par M. Fabry pour l'expression des watts consommés dans la bobine,

$$W = \rho \eta r_0 \frac{H^2}{K^2},$$

ici la valeur de K^2 est

$$K^2 = \frac{2\pi \sin 2\alpha \left(L \frac{r_1}{r_0} \right)^2 r_0}{r_1 - r_0} 10^{-9},$$

W étant exprimé en watts et ρ en ohms-centimètres, ainsi que dans le Mémoire cité.

» La bobine construite correspond à

$$K = 0,204.$$

» Or M. Fabry admet qu'il est prudent d'admettre $K = 0,20$.

» On voit donc que la bobine réalisée répond comme conditions de forme aux meilleures bobines à conducteurs de sections variables, considérées comme réalisables.

» D'autre part, M. Fabry admet un coefficient de foisonnement égal à 1,5 seulement alors que celui de notre bobine est égal à 2, et il calcule l'énergie dépensée avec une résistivité égale à $0,27.10^{-6}$ seulement (température de l'air liquide), tandis que nous avons opéré à la température ordinaire pour laquelle on peut admettre $\rho = 1,65.10^{-6}$.

» Dans les conditions où nous nous étions placés pour obtenir 64 000 gauss avec la bobine étudiée par M. Fabry il aurait fallu 340 kilowatts; or notre bobine, si elle avait été intacte, en aurait absorbé 366 pour produire le même champ dans les mêmes conditions de creux; on peut donc considérer qu'elle jouit presque des propriétés de la bobine indiquée dans ce Mémoire.

» C'est d'ailleurs avec les bobines de cette forme, qui se prêtent admirablement au refroidissement et sont d'une construction relativement facile, que sera excité l'électro-aimant que nous nous proposons de construire et qui devra donner un champ voisin de 100 000 gauss, avec un poids de quelques tonnes seulement, et un creux de 7,5 cm.

» Une dernière remarque est la suivante :

» Dans ces appareils, le champ est beaucoup plus étendu en longueur et en largeur que dans les électro-aimants ordinaires. On peut penser que, dans l'expérience que nous avons faite, 50 000 gauss ont été produits dans un cylindre de 1 cm de longueur sur 2 cm de diamètre. Ils permettent d'ailleurs très facilement l'observation longitudinale si difficile à réaliser avec des champs élevés dans les appareils ordinaires. »

M. le PRÉSIDENT. — « Je remercie M. Perot de la très intéressante Communication qu'il vient de nous faire sur les importants

travaux par lesquels il a pu, en collaboration avec M. Deslandres, obtenir des progrès presque inespérés dans la production des champs magnétiques de très grande intensité.

» Je n'ai pas besoin de souligner les difficultés de toutes sortes qui s'opposaient à la réalisation d'un pareil dessein et qui ont été victorieusement surmontées. Je n'ai pas besoin non plus de vous rappeler quels progrès on peut attendre de l'emploi de champs magnétiques extrêmement intenses dans l'étude de la constitution intime de la matière.

» Vos applaudissements ont montré à M. Perot quel vif intérêt a soulevé l'exposé de ses travaux et j'espère que nous aurons prochainement la possibilité de prendre connaissance d'une nouvelle avance dans cet intéressant ordre d'idées.»

La séance est levée à 18 h 45 m.

SUR LES LIGNES ET APPAREILS TÉLÉPHONIQUES ⁽¹⁾.

M. L. CAHEN. — « Je me propose d'exposer ici comment d'une façon générale on peut traiter par le calcul les problèmes de la transmission des courants électriques sinusoïdaux dans les ensembles complexes de lignes et d'appareils. Les formules générales que j'indiquerai s'appliquent à des courants de toute fréquence et par suite à ceux de l'électricité industrielle; mais toutes les applications que je ferai seront relatives aux courants téléphoniques.

» On a pris l'habitude d'appeler *réflexions* les phénomènes qui se produisent quand le courant électrique passe d'une ligne dans une autre ou d'une ligne dans un appareil. Voici comment on justifie cette appellation.

» Une force électromotrice sinusoïdale, E_0 , produite à l'origine d'une ligne, donne naissance à un courant d'intensité $I_0 = \frac{E_0}{Z}$. L'impédance Z , qui dépend des spécifications de la ligne, est appelée « impédance caractéristique » de cette ligne. Une onde électrique se propage le long de la ligne en s'amortissant : en un point situé à une distance x de l'origine, $E = E_0 e^{-ax}$ et $I = \frac{E_0}{Z} e^{-ax}$, a étant un coefficient complexe égal à $\beta + i\alpha$. β est ce qu'on nomme le *coefficient d'affaiblissement* ou *d'amortissement* de la ligne par unité de longueur : il indique la rapidité avec laquelle l'onde s'amortit; α est le coefficient de longueur d'onde : pour deux points situés à la distance $\frac{2\pi}{\alpha}$ l'un de l'autre sur la ligne, l'intensité et la différence de potentiel sont en phase; enfin a est appelé « coefficient de transmission ».

» Si, à l'extrémité l de la ligne, nous supposons que se trouve une autre ligne de longueur l' dont l'impédance caractéristique soit Z' , et le coefficient de transmission a' , on peut considérer qu'un courant d'intensité $\frac{2Z}{Z+Z'} I_0 e^{-al}$ est transmis sur l'autre ligne,

⁽¹⁾ Communication présentée en séance du 6 mai 1915.

tandis qu'un courant d'intensité $\frac{Z-Z'}{Z+Z'} I_0 e^{-\alpha l}$ est renvoyé sur la première. Il naît ainsi deux nouvelles ondes qui se propagent toutes deux en s'amortissant suivant la loi indiquée plus haut, se réfléchissent de nouveau aux extrémités libres, etc. Si les deux lignes sont assez longues pour que $e^{-2\beta l}$ et $e^{-2\beta l'}$ soient négligeables devant l'unité, l'intensité des réflexions secondaires sera négligeable et l'on dira que la réflexion au point de jonction est complète. Dans le cas contraire, le potentiel et l'intensité du courant en un point quelconque de la ligne peuvent s'écrire :

$$(1) \quad \begin{cases} E = \Sigma A E_0 e^{-\alpha x} + \Sigma B E_0 e^{-\alpha(2l-x)} = M e^{-\alpha x} + N e^{\alpha x}, \\ I = \frac{\Sigma A E_0}{Z} e^{-\alpha x} - \frac{\Sigma B E_0}{Z} e^{-\alpha(2l-x)} = \frac{M e^{-\alpha x} - N e^{\alpha x}}{Z}, \end{cases}$$

ΣA et ΣB étant des séries convergentes; les termes M et N dépendent de la caractéristique Z et de celles des lignes ou appareils mis au bout.

» Ces équations, sous leur seconde forme, s'obtiennent directement en partant de l'équation des télégraphistes, qui donne également les valeurs de Z et de α en fonction des valeurs ρ , λ , γ , σ de la résistance, de la self, de la capacité et de la perte par unité de longueur :

$$Z = \sqrt{\frac{\rho + i\omega\lambda}{\sigma + i\omega\gamma}}, \quad \alpha = \sqrt{(\rho + i\omega\lambda)(\sigma + i\omega\gamma)}.$$

» Il y a évidemment toujours intérêt, si l'on veut que l'intensité du courant transmis au bout d'une ligne soit la plus grande possible, à ce que βl soit le plus petit possible : c'est pourquoi la Conférence internationale des Techniciens télégraphistes de 1910 a émis l'avis qu'on pouvait en première analyse juger de la valeur téléphonique d'une ligne par celle de son coefficient d'affaiblissement. Mais l'intensité utile transmise dans les appareils récepteurs sera modifiée dans un sens favorable ou défavorable par les réflexions, d'autant plus fortes que le rapport $\frac{Z}{Z'}$ des impédances caractéristiques est plus éloigné de l'unité.

» Pour calculer l'effet de ces réflexions, il est commode de tirer des équations (1) les suivantes qui indiquent les valeurs de l'inten-

sité et de la différence de potentiel à l'origine d'une ligne, en fonction des valeurs de ces mêmes quantités à l'extrémité :

$$(2) \quad \begin{cases} E_0 = AE + BI = \operatorname{ch} al \times E + Z \operatorname{sh} al \times I, \\ I_0 = AI + CE = \operatorname{ch} al \times I + \frac{\operatorname{sh} al}{Z} \times E, \\ A^2 - BC = 1. \end{cases}$$

Si l'extrémité de cette ligne se trouve reliée à une ligne différente, on pourra écrire entre E , I et E' , I' une relation linéaire analogue et ainsi de suite. Finalement on verra que, si l'on appelle de nouveau E et I les valeurs à l'extrémité de la série de lignes, les équations suivantes sont vérifiées

$$(2') \quad \begin{cases} E_0 = AE + BI, \\ I_0 = A'I + CE, \\ AA' - BC = 1. \end{cases}$$

D'où il résulte qu'on peut définir des quantités complexes al , Z_1 et Z_2 telles que

$$\begin{aligned} E_0 &= \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} \operatorname{ch} al \times E + \sqrt{Z_1 Z_2} \operatorname{sh} al \times I, \\ I_0 &= \sqrt{\frac{Z_2}{Z_1}} \operatorname{ch} al \times I + \frac{\operatorname{sh} al}{\sqrt{Z_1 Z_2}} \times E. \end{aligned}$$

Les équations (2') sous leur seconde forme montrent qu'il existe un coefficient $al = (\beta + i\alpha)l$ qui joue, pour l'ensemble considéré, au point de vue des actions extérieures, un rôle analogue à celui du coefficient de transmission pour une ligne uniforme. Il convient d'ailleurs de remarquer que al n'est pas en général égal à $\Sigma a_k l_k$, somme des coefficients correspondant aux sections élémentaires. La partie réelle de ($R = al - \Sigma a_k l_k$) pourra être appelée le *coefficient d'affaiblissement dû aux réflexions* : elle pourra d'ailleurs être positive ou négative.

» Il serait facile de voir qu'un ensemble de lignes uniformes en dérivation l'une sur l'autre satisfait également aux équations (2'). Un système quelconque de lignes obéit donc à ces équations et peut être défini par son coefficient al et par les impédances Z_1 et Z_2 correspondant respectivement à chaque extrémité.

Le coefficient βl pourra, là encore, en première analyse, être considéré comme définissant la valeur de la communication considérée.

» Si l'on se reporte aux équations (2) sous leur première forme, on voit facilement qu'elles permettent (toujours au point de vue des actions extérieures) d'assimiler une ligne uniforme au système symétrique d'impédances « en H » représenté ci-dessous (fig. 1); r et

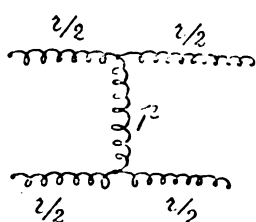


Fig. 1.

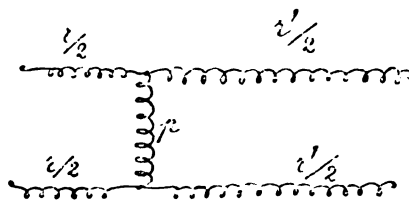


Fig. 2.

p s'expriment facilement en fonction de al et de Z . De même les équations (2') sous leur première forme montrent qu'un système quelconque de lignes uniformes hétérogènes peut être représenté par un système dissymétrique d'impédances en H (fig. 2); r , r' et p s'expriment facilement en fonction de Z_1 , Z_2 et al .

» Inversement, un tel système d'impédances peut donc être assimilé à un système de lignes uniformes, et comme, ainsi qu'on le verra plus loin, tout système d'impédances peut se ramener à ce type, il en résulte que tout système de lignes ou d'impédances satisfait aux équations (2').

» Ceci posé, au point de vue pratique, on peut distinguer deux sortes de réflexions : les unes peuvent être appelées *intérieures* : ce sont celles qui se produisent entre lignes et appareils reliés invariablement les uns aux autres, c'est-à-dire formant une communication directe entre deux bureaux ou entre un bureau et un appareil d'abonné.

» Mais cette communication doit, en pratique, être reliée par l'intermédiaire de bureaux à différents ensembles de lignes et d'appareils ; pour apprécier complètement la valeur de la transmission, il faut examiner quel sera, dans les cas usuels, l'effet des réflexions *extérieures*. Cette étude peut être menée à bien, quand on connaît les coefficients al , Z_1 et Z_2 définis ci-dessus, pour la communication considérée, ainsi que les grandeurs correspondantes

des ensembles placés à chaque bout. Toutefois, comme il s'agit ici de suivre la transmission jusqu'à l'appareil d'abonné lui-même, on ne pourra pas exprimer le résultat trouvé sous la forme d'un coefficient d'affaiblissement : on calculera la valeur de l'intensité efficace qui passe dans le récepteur téléphonique. En général, d'ailleurs, on n'aura pas besoin de connaître la valeur absolue de l'intensité; les problèmes qu'on aura à résoudre en pratique peuvent en effet se ramener aux deux suivants : 1^o étant donnée une communication, quelle portée permet-elle d'atteindre et y a-t-il lieu ou non de l'améliorer? 2^o quelle spécification est-il le plus avantageux d'adopter pour relier deux bureaux donnés et assurer des relations données? Pour pouvoir résoudre le premier problème, il suffit de pouvoir comparer la communication à une autre sur laquelle on possède des résultats d'expérience; pour résoudre le second, il suffit de pouvoir comparer entre eux les effets produits par les diverses spécifications envisagées.

» Ces deux problèmes sont résolus si l'on connaît une formule indiquant le rapport entre l'intensité I_f qui parvient dans l'appareil récepteur quand un système de lignes et d'impédances défini par (Z_1, Z_2, al) est intercalé et l'intensité I_s qui parvient dans le même appareil quand ce système est supprimé. L'équation se déduit facilement des équations (1); soit AA'BB' le système considéré (voir fig. 3); soit Z_d l'impédance apparente mesurée entre A

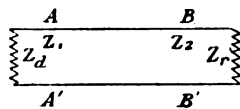


Fig. 3.

et A' de l'ensemble de lignes et d'appareils du côté où l'impédance caractéristique du système est Z_1 ; soit Z_r l'impédance apparente, mesurée entre B et B', de l'ensemble placé de l'autre côté du système

$$(3) \quad \frac{I_f}{I_s} = \frac{Z_1 Z_r + Z_2 Z_d}{\sqrt{Z_1 Z_2} (Z_d + Z_r)} \operatorname{ch} al + \frac{Z_1 Z_2 + Z_r Z_d}{\sqrt{Z_1 Z_2} (Z_d + Z_r)} \operatorname{sh} al.$$

» On peut d'ailleurs poser $\frac{I_f}{I_s} = e^\beta$, et nommer β , l'affaiblissement apparent du système considéré dans les conditions données.

» En résumé, pour étudier un ensemble de lignes et d'impédances formant une communication, il faut d'abord connaître les réflexions intérieures et déterminer al , Z_1 et Z_2 en fonction des caractéristiques des éléments constituant l'ensemble; il faut ensuite étudier les réflexions extérieures et pour cela il suffit de résoudre pour les valeurs usuelles de Z_d et de Z_r l'équation (3) relative à cet ensemble.

» Nous allons rapidement passer en revue différents cas particuliers où l'on peut trouver facilement la solution de ces deux problèmes.

I.

CAS DE DEUX LIGNES UNIFORMES EN SÉRIE.

» Nous désignerons respectivement par Z et Z' , al et $a'l'$ les valeurs des coefficients de transmission et de l'impédance caractéristique des deux lignes, par $2p$ (notation de M. Breisig) l'expression $\frac{Z}{Z'} + \frac{Z'}{Z}$, par q l'expression $\frac{Z-Z'}{Z+Z'}$; enfin par AL , Z_1 et Z_2 les grandeurs caractéristiques de l'ensemble résultant.

» Le coefficient d'affaiblissement est donné par les équations

$$\begin{aligned} \operatorname{ch} AL &= \sqrt{\operatorname{ch}^2 al \operatorname{ch}^2 a'l' + \operatorname{sh}^2 al \operatorname{sh}^2 a'l' + 2p \operatorname{sh} al \operatorname{sh} a'l' \operatorname{ch} al \operatorname{ch} a'l'} \\ &= \operatorname{ch}(al + a'l' + R) \end{aligned}$$

ou

$$\operatorname{ch} AL = \sqrt{\operatorname{ch}^2(al + a'l') + \frac{p-1}{2} \operatorname{sh} 2al \operatorname{sh} 2a'l'}.$$

» Dès que $al + a'l'$ est grand, on peut écrire

$$e^{AL} = e^{al+a'l'+R} = e^{al+a'l'} \sqrt{\frac{p+1}{2} - \frac{p-1}{2} (e^{-2al} + e^{-2a'l'})};$$

d'où

$$(4) \quad R = \frac{1}{2} \log_e \frac{p+1}{2} + \frac{1}{2} \log_e [1 - q^2 (e^{-2al} + e^{-2a'l'})].$$

» Si al est grand le terme en e^{-2al} disparaît; si enfin $a'l'$ est grand aussi, il ne reste que le premier terme : la partie réelle de ce premier terme $\frac{1}{2} \log_e \frac{p+1}{2}$ est le coefficient d'affaiblissement r , correspondant à la réflexion complète.

» Les formules précédentes s'appliquent immédiatement au cas où, au lieu de deux lignes, on considère deux ensembles complexes : il suffit de remplacer respectivement Z et Z' par les deux impédances caractéristiques correspondant au côté commun aux deux lignes.

» On voit que la réflexion complète est atteinte assez vite : il suffit que $e^{-2(al+a'l')}$, e^{-4al} et $e^{-4a'l''}$ soient négligeables devant l'unité.

» Examinons plus en détail le cas d'une ligne longue mise en série avec une autre dont on pourra faire croître la longueur de zéro à l'infini. Le coefficient R est alors

$$(5) \quad R = \frac{1}{2} \log \frac{p+1}{2} + \frac{1}{2} \log_e (1 - q^2 e^{-4a'l''}).$$

» Le terme $q^2 e^{-4a'l''}$ est égal à q^2 pour $l'' = 0$: quand l'' augmente, ce terme diminue en module ; dans le plan xy (fig. 4) la courbe repré-

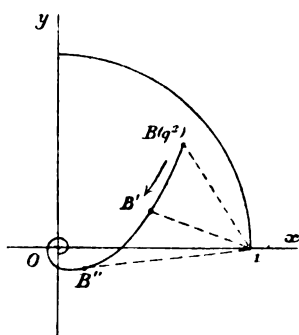


Fig. 4.

sentative de $q^2 e^{-4a'l''}$ est une spirale qui se rapproche de l'origine : q^2 est d'ailleurs toujours inférieur à 1. La quantité $1 - q^2 e^{-4a'l''}$ s'obtiendra en joignant le point A situé sur l'axe des x à la distance 1 du centre aux différents points de la courbe $BB'B''$. C'est le logarithme de ces vecteurs AB , AB' , AB'' qu'il faudra ajouter à $\frac{1}{2} \log \frac{p+1}{2}$ pour avoir R .

» A l'origine, le vecteur AB est égal à $\frac{2}{p+1}$: il n'y a pas d'affaiblissement dû aux réflexions ; puis il peut arriver que AB' soit plus petit que AB ; dans ce cas la réflexion est négative ou favorable, car le logarithme de $1 - q^2 e^{-4a'l''}$ est négatif et sa partie réelle

plus grande que r_c . Il est facile de voir dans quel cas cet effet se produira; il faut : 1° que l'argument de q^2 soit positif puisque la courbe est décrite dans le sens de la flèche; 2° que q^2 soit aussi grand que possible; 3° que la spirale ne se rapproche pas trop vite de l'origine, c'est-à-dire que α' soit grand par rapport à β' .

» On peut d'ailleurs facilement retrouver ces résultats d'après la formule. Quand $a'l'$ est petit,

$$e^n = \sqrt{1 + 2(p-1)\alpha'l'} = 1 + (p-1)\alpha'l' = 1 + R.$$

Si $p = p_1 + ip_2$, α' étant égal à $\beta' + i\alpha'$, on voit que

$$(\text{partie réelle de } R) = [(p_1-1)\beta' - p_2\alpha']l',$$

quantité qui devient négative quand p_1 est inférieur à 1, ou que p_2 est grand par rapport à $p_1 - 1$ et α' par rapport à β' .

» Le coefficient de réflexion est toujours petit quand l' est petit, mais il peut être important par rapport à β' : par exemple, si la ligne longue est une ligne pupinisée d'impédance 1500 et la ligne courte un câble souterrain d'impédance 190^{-33} , on trouve que

$$(\text{partie réelle de } R) \times \frac{1}{l'} = -0,018,$$

alors que $\beta' = +0,022$. L'affaiblissement est donc presque annulé par la réflexion.

» Ce résultat semble montrer que l'influence des câbles très courts intercalés en série sur les lignes aériennes ou pupinisées est moins fâcheux et l'emploi des câbles cuirassés ou des bobines Pupin moins utile qu'on ne le croit généralement; il est vrai que le phénomène ne se produit que pour des longueurs extrêmement courtes; dans le cas des deux lignes considérées ci-dessus, quand le câble atteint 5 km, l'affaiblissement de réflexion est déjà positif et atteint 0,19; d'autre part, l'affaiblissement propre du câble est supérieur, pour le même diamètre de fil, à celui des lignes Pupin ou Krarup; il serait néanmoins intéressant de connaître des résultats d'expérience pour ces très courtes longueurs de câbles; des essais récents faits en France ont donné des résultats incertains.

» Quand la longueur l' de la seconde ligne croît, le vecteur $A'B'$ augmente; il dépasse l'unité, ce qui veut dire que l'affaiblissement

de réflexion dépasse r_c , puis $A'B'$ se rapproche de la valeur 1 en oscillant autour. La réflexion peut donc être très fâcheuse quand la ligne la plus courte a une longueur telle que $A'B' > 1$. Ce cas se produit par exemple entre 10 ou 20 km pour les lignes souterraines en fil de 2,5 mm considérées ci-dessus placées au bout des lignes aériennes ou pupinisées : l'écart peut atteindre 0,05.

» Quand à la réflexion complète, elle est d'autant plus grande que d'une part les modules de Z et de Z' sont plus éloignés l'un de l'autre et d'autre part que leurs arguments sont plus voisins. Si $Z = Z' \cos \varphi$,

$$\frac{\rho + 1}{2} = \frac{1}{4} \sqrt{6 + 10 \cos \varphi - 2 \sin \varphi},$$

ce qui est au plus égal à 1; si $\varphi = \frac{\pi}{2}$, l'affaiblissement est négatif et égal à $-0,36$; sur les lignes uniformes pour lesquelles l'argument est compris entre 0° et -45° , l'affaiblissement négatif peut tout au plus atteindre quelques centièmes.

» La valeur des impédances caractéristiques Z_1 et Z_2 de l'ensemble formé par les deux lignes se déduit facilement de l'équation (1). Dans le cas où l'une des deux lignes est longue, on trouve pour l'impédance Z_2 du côté de l'autre ligne ($Z', a'l'$)

$$(6) \quad Z_2 = Z' \frac{1 + q e^{-2a'l'}}{1 - q e^{-2a'l'}}.$$

» Le coefficient de Z' ne dépend que du terme $q e^{-2a'l'}$ déjà considéré pour les affaiblissements. Pour les très faibles valeurs de l' ,

$$Z_2 = Z - \frac{Z^2 - Z'^2}{Z'} a' l'.$$

» Puis, quand l croît, le point qui représente, dans le plan des xy , $\frac{Z_2}{Z'}$ (fig. 5) se rapproche du point A situé sur l'axe des x à une distance $OA = 1$ de l'origine. Il tourne autour de ce point; l'argument de Z_2 sera donc tantôt plus petit, tantôt plus grand que celui de Z' . Tandis que le décalage de l'impédance caractéristique d'une ligne uniforme reste toujours inférieur à 45° , celui de l'ensemble complexe considéré peut atteindre 70° ; c'est ce qui se produit par exemple quand un câble d'impédance 190^{-3} en fil de 2,5 mm,

long de 15 km, est mis en série avec une ligne longue pupinisée d'impédance 1500. Le module de l'impédance Z_2 sera aussi alternativement plus grand ou plus petit que $|Z'|$. Ces deux variations, celle de l'argument et celle du module, seront d'ailleurs d'autant

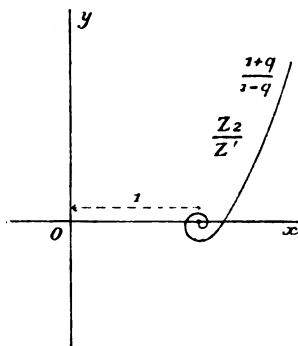


Fig. 5.

plus marquées que le coefficient d'onde α' de la ligne courte sera plus grand par rapport à β' ; le cas dans lequel $\frac{\alpha'}{\beta'}$ est le plus grand est celui des lignes pupinisées; ce fait explique peut-être dans une certaine mesure comment un défaut d'uniformité faible dans les propriétés de la ligne, dans l'écartement ou les caractéristiques des bobines Pupin pourra faire varier fortement la valeur de l'impédance caractéristique mesurée.

» D'autre part, on peut aussi conclure de cette étude qu'une ligne aéro-souterraine peut produire des réflexions plus fortes, quand le câble qui en constitue une des parties est mis en série avec des lignes ou des ensembles à impédance caractéristique élevée, que ne ferait un câble indéfini de même nature.

» La connaissance des valeurs de Z_1 , Z_2 et AL permet de résoudre le second problème général que nous nous sommes posé. On peut aussi chercher à résoudre le problème plus simple qui consiste à calculer l'effet produit par une section de ligne uniforme placée entre deux ensembles quelconques. La formule (3) devient alors, en désignant par $a'l'$ et Z' les grandeurs qui définissent la ligne uniforme

$$(3') \quad \frac{I_f}{I_s} = \text{ch } a'l' + \frac{Z'^2 + Z_d Z_r}{Z'(Z_d + Z_r)} \text{sh } a'l'.$$

» En appliquant cette équation au cas où il s'agit d'un câble placé entre une ligne aérienne longue et une autre ligne aérienne courte ou un réseau souterrain, on trouve que, quand la longueur de câble à poser est courte, il n'y a presque pas d'avantage à augmenter le diamètre au-dessus de 2 mm ou 2,5 mm. Ce fait bien connu montre qu'on doit dans ce cas chercher de préférence à utiliser des lignes Krarup ou Pupin. Quand la ligne est très courte, l'équation (3') devient simplement

$$\frac{I_f}{I_s} = 1 + \left[\frac{Z'}{Z_r + Z_d} + \frac{Z_r Z_d}{(Z_d + Z_r) Z'} \right] a' l'.$$

» Le module de cette quantité peut être plus grand ou plus petit que 1 suivant les valeurs des grandeurs figurant dans la parenthèse.

II.

CAS DE TROIS LIGNES UNIFORMES EN SÉRIE.

» Soient $Z, al; Z', a'l'; Z'', a''l''$ les quantités qui définissent respectivement les ensembles.

» L'expression générale permettant de calculer AL est compliquée : nous la donnerons dans quatre cas particuliers.

» 1^o al et $a''l''$ sont grands, alors

$$(7) \quad e^{AL} = \frac{e^{al+a''l''+R}}{1} \\ = \frac{e^{al+a''l''}}{2} \left[\operatorname{ch} a' l' \left(\sqrt{\frac{Z''}{Z}} + \sqrt{\frac{Z}{Z''}} \right) + \operatorname{sh} a' l' \left(\frac{\sqrt{ZZ'}}{Z'} + \frac{Z'}{\sqrt{ZZ''}} \right) \right],$$

e^R est égal, au facteur $\frac{Z+Z''}{ZZ''}$ près, au second membre de l'équation (3') quand on y remplace Z_d par Z et Z_r par Z'' : cette proportionnalité était d'ailleurs évidente *a priori*.

» Si la ligne intermédiaire n'est pas uniforme et a deux caractéristiques Z_1 et Z_2 , l'équation devient

$$(7') \quad e^R = \left[\left(\sqrt{\frac{Z_1 Z''}{Z_2 Z}} + \sqrt{\frac{Z_2 Z}{Z_1 Z''}} \right) \operatorname{ch} a' l' + \left(\sqrt{\frac{Z_1 Z_2}{Z Z''}} + \sqrt{\frac{Z Z''}{Z_1 Z_2}} \right) \operatorname{sh} a' l' \right].$$

» 2° $a'l'$ seul est grand,

$$(8) \quad \text{ch}^2 AL = \frac{e^{2a'l'}}{4} \left[\text{ch} 2al \text{ch} 2a''l'' + \frac{1}{2} \left(\frac{Z}{Z'} + \frac{Z'}{Z} \right) \text{ch} 2al \text{sh} 2a''l'' \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \left(\frac{Z''}{Z'} + \frac{Z'}{Z''} \right) \text{ch} 2a''l'' \text{sh} 2al \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \left(\frac{Z''}{Z} + \frac{Z}{Z''} + \frac{Z'^2}{ZZ''} + \frac{ZZ''}{Z'^2} \right) \text{sh} 2al \text{sh} 2a''l'' \right].$$

» 3° Si toutes les lignes sont longues, il y a réflexion complète et la valeur r_c du coefficient correspondant est

$$(9) \quad r_c = \text{partie réelle de } \log \frac{1}{4} \left[\sqrt{\frac{Z}{Z''}} + \sqrt{\frac{Z''}{Z}} + \frac{\sqrt{ZZ''}}{Z'} + \frac{Z'}{\sqrt{ZZ''}} \right].$$

» 4° Si l'ensemble est symétrique, c'est-à-dire si $al = a''l''$ et $Z = Z''$, on obtient

$$(10) \quad \text{ch} AL = \text{ch} a'l' \text{ch} 2al + \frac{1}{2} \left(\frac{Z}{Z'} + \frac{Z'}{Z} \right) \text{sh} a'l' \text{sh} 2al.$$

» Si al est grand,

$$(10') \quad R = \log \frac{P+1}{2} + \log(1 - q^2 e^{-2a'l'}).$$

» Dans ce cas la loi de variation de R quand l' varie est tout à fait semblable à celle qu'on a vue dans le cas de deux lignes, à cette différence près que le coefficient de q^2 est $e^{-2a'l'}$ et non plus $e^{-4a'l'}$: la réflexion complète, qui produit un affaiblissement r_c double de celui qui est obtenu dans le cas de deux lignes, est atteinte moins rapidement.

» Si c'est $a'l'$ qui est grand, l'équation devient

$$R = \log \frac{P+1}{2} + \log(1 - q^2 e^{-4a'l'}),$$

R est exactement le double de la valeur correspondante dans le cas de deux lignes; ce résultat est d'ailleurs évident *a priori* puisqu'en raison de la longueur de la ligne intermédiaire, les réflexions aux deux bouts sont sans action l'une sur l'autre et s'ajoutent par suite purement et simplement.

» Dans le cas où l'ensemble est symétrique, l'impédance caractéristique est la même aux deux bouts, elle est donnée par l'équa-

tion

$$Z_a^2 = Z^2 \frac{ZZ' \operatorname{sh} 2al \operatorname{ch} a'l' + \left[\frac{Z^2 + Z'^2}{2} \operatorname{ch} 2al + \frac{Z^2 - Z'^2}{2} \right] \operatorname{sh} a'l'}{ZZ' \operatorname{sh} 2al \operatorname{ch} a'l' + \left[\frac{Z^2 + Z'^2}{2} \operatorname{ch} 2al + \frac{Z'^2 - Z^2}{2} \right] \operatorname{sh} a'l'}.$$

III.

RÉFLEXIONS ENTRE LIGNES ET APPAREILS.

» Tous les ensembles d'appareils, d'impédances, de transformateurs peuvent être considérés comme équivalant au système d'impédances « en H » indiqué plus haut (*fig. 2*).

» Les équations qui permettent de calculer E_0 , I_0 en fonction de E , I sont

$$(11) \quad \begin{cases} E_0 = \left(1 + \frac{r}{p}\right) E + \left(r + r' + \frac{rr'}{p}\right) I, \\ I_0 = \left(1 + \frac{r'}{p}\right) I + \frac{E}{p}. \end{cases}$$

» En identifiant ces coefficients avec ceux de l'équation (2) on trouve les valeurs des grandeurs caractéristiques de l'ensemble de lignes qui au point de vue des actions extérieures équivalent au système considéré :

$$\operatorname{ch}^2 AL = \left(1 + \frac{r}{p}\right) \left(1 + \frac{r'}{p}\right),$$

$$Z_1^2 = \frac{p+r}{p+r'} [p(r+r') + rr'], \quad Z_2^2 = \frac{p+r'}{p+r} [p(r+r') + rr'].$$

» Quand il s'agit d'un transformateur, l'assimilation avec l'impédance en H suppose que le fer travaille à faible induction, pour que les coefficients de self et d'induction mutuelle soient indépendants de l'intensité : il faut aussi que l'effet d'hystérésis soit négligeable; enfin, on doit prendre comme sens de la différence de potentiel à la sortie le sens contraire à celui qui est admis dans l'électricité industrielle.

» Ces hypothèses étant admises, on peut assimiler un transformateur soit à un système « en H », soit à une série de lignes uniformes. Soient R_0 , L_0 la résistance et la self de l'enroulement primaire, R_1 , L_1 la résistance et la self de l'enroulement secondaire,

M le coefficient d'induction mutuelle, ω la pulsation du courant, l'identification avec les coefficients des équations du système en H donne

$$(12) \quad r = R_0 + i\omega(L_0 - M), \quad r' = R_1 + i(L_1 - M)\omega, \quad p = M\omega i,$$

et d'autre part l'identification avec les équations (2) donne

$$(12') \quad \left\{ \begin{array}{l} \operatorname{ch}^2 al = \frac{(R_0 + i\omega L_0)(R_1 + i\omega L_1)}{-M^2\omega^2}, \\ Z_1^2 = \frac{R_0 + iL_0\omega}{R_1 + iL_1\omega} [(R_0 + iL_0\omega)(R_1 + iL_1\omega) + M^2\omega^2] = \frac{R_0 + iL_0\omega}{R_1 + iL_1\omega} T, \\ Z_2^2 = \frac{R_1 + iL_1\omega}{R_0 + iL_0\omega} T. \end{array} \right.$$

» Ceci posé, pour juger de l'effet produit par l'introduction, dans des conditions quelconques, d'un système donné d'impédances en H , il suffit de remplacer, dans les équations générales, les fonctions hyperboliques et les impédances caractéristiques correspondant à l'une des lignes ou ensembles par leur valeur en fonction de r, r' et p .

» Nous examinerons deux cas.

» A. *Étude d'un système en H symétrique placé au milieu d'une section de ligne.* — Soient al et Z les quantités qui déterminent la ligne (l est la longueur totale de la ligne située de chaque côté du système d'impédances). Soient $a'l'$ et Z' les quantités caractéristiques de la ligne fictive équivalente au système d'impédances considéré; on a vu que, dans ces conditions, le coefficient AL de l'ensemble est donné par l'équation

$$\operatorname{ch} AL = \operatorname{ch} a'l' \operatorname{ch} al + \frac{1}{2} \left(\frac{Z}{Z'} + \frac{Z'}{Z} \right) \operatorname{sh} a'l' \operatorname{sh} al.$$

» Il suffit de remplacer $\operatorname{ch} a'l', Z' \operatorname{sh} a'l'$ et $\frac{\operatorname{sh} a'l'}{Z'}$ par leurs valeurs tirées des équations (11) pour obtenir l'équation

$$(13) \quad \operatorname{ch} AL = \operatorname{ch} al \left(1 + \frac{r'}{p} \right) + \frac{\operatorname{sh} al}{2} \left[\frac{Z}{p} + \frac{r}{Z} \left(2 + \frac{r}{p} \right) \right].$$

» Si, en particulier, p est infini,

$$(13') \quad \operatorname{ch} AL = \operatorname{ch} al + \frac{r'}{Z} \operatorname{sh} al.$$

» C'est l'équation qui, dans les théories de Campbell et de M. Bressig, sert de point de départ à l'étude des lignes pupinisées. r est égal à la demi-impédance d'une bobine d'après les conventions faites.

» Si, au contraire, $r = 0$,

$$(13'') \quad \operatorname{ch} AL = \operatorname{ch} al + \frac{Z}{2\rho} \operatorname{sh} al.$$

» C'est l'équation qui sert de base à la théorie des shunts inductifs.

» L'équation (13) permet de trouver la valeur du coefficient d'affaiblissement résultant β_1 . En effet si l'on écrit

$$\operatorname{ch} AL = \operatorname{ch} \beta_1 \cos \alpha_1 + i \operatorname{sh} \beta_1 \sin \alpha_1 = P + Qi,$$

on voit que

$$\operatorname{ch}^2 \beta_1 = \frac{1 + P^2 + Q^2 + \sqrt{[(P+1)^2 + Q^2][(P-1)^2 + Q^2]}}{2}.$$

» Ceci posé, on peut résoudre d'une façon rigoureuse le problème suivant :

» *Si l'on choisit une loi de variation telle que P et Q dépendent d'une seule variable, pour quelle valeur de la variable x l'affaiblissement sera-t-il minimum?*

» Je remarque d'abord que trouver le minimum de β_1 revient à trouver celui de $\operatorname{ch}^2 \beta_1$. Ceci dit, en annulant la dérivée de la fonction $\operatorname{ch} \beta_1$, on trouve l'équation

$$PQ \left[\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 - \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right)^2 \right] + \frac{\partial P}{\partial x} \frac{\partial Q}{\partial x} (1 + Q^2 - P^2) = 0$$

et l'expression de $\operatorname{ch}^2 \beta_1$ correspondante peut s'écrire

$$\operatorname{ch}^2 \beta_1 = \frac{\frac{P \partial P}{\partial x}}{\frac{P \partial P}{\partial x} + \frac{Q \partial Q}{\partial x}}.$$

» Si, en particulier, nous supposons une loi linéaire

$$P = m + m'x,$$

$$Q = n + n'x,$$

L'équation indiquée plus haut donne pour x la valeur

$$x = \frac{m' n' - (m n' - n m') (m m' + n n')}{(m n' - n m') (m'^2 + n'^2)}.$$

» Or, cette loi de variation linéaire est précisément réalisée, quand il s'agit de selfs, soit en série, soit en dérivation, si l'on suppose que la résistance des bobines est proportionnelle à leur self et si l'on prend comme variable dans le premier cas cette self, et dans le second son inverse.

» Dans les deux cas, on voit facilement, en se reportant aux expressions (13') et (13''), que l'on peut écrire

$$\operatorname{ch} AL = \operatorname{ch} al + B e^{i\varphi} \times \operatorname{sh} al \times x,$$

d'où

$$m = \operatorname{ch} \beta l \cos \alpha l,$$

$$n = \operatorname{sh} \beta l \sin \alpha l,$$

$$m' = B [\cos \varphi \operatorname{sh} \beta l \cos \alpha l - \sin \varphi \operatorname{ch} \beta l \sin \alpha l],$$

$$n' = B [\cos \varphi \operatorname{ch} \beta l \sin \alpha l + \sin \varphi \operatorname{sh} \beta l \cos \alpha l].$$

» En appliquant l'équation du minimum, on trouve

$$(14) \quad x = -\frac{1}{B} \sin \varphi \cos \varphi \frac{\operatorname{ch}^2 \beta l - \cos^2 \alpha l}{\sin \alpha l \cos \alpha l \cos \varphi + \operatorname{sh} \beta l \operatorname{ch} \beta l \sin \varphi}.$$

» Le minimum n'existe que si cette quantité est positive. Le dénominateur est toujours en fait du même signe que le terme $\operatorname{sh} \beta l \operatorname{ch} \beta l \sin \varphi$. Il faut donc que $\cos \varphi$ soit négatif, c'est-à-dire $\varphi > \frac{\pi}{2}$.

En se reportant aux valeurs de φ tirées des équations, on verrait que cela revient à dire que les arguments de l'impédance caractéristique de la ligne et de l'impédance intercalée soit en série, soit en dérivation, diffèrent de plus de $\frac{\pi}{2}$; comme ces arguments sont compris entre

$$-\frac{\pi}{2} \quad \text{et} \quad +\frac{\pi}{2},$$

ils doivent donc être de sens contraire; l'impédance des lignes étant une capacité, l'impédance intercalée doit être une self, et le rapport $H = \frac{R}{L}$ doit être aussi petit que possible.

» Si l'on néglige les termes de degré supérieur à 2 dans le dévelop-

pement des fonctions hyperboliques et circulaires de la formule (14), on obtient la valeur approchée

$$x = -\frac{1}{B} \sin \varphi \cos \varphi \frac{\beta^2 - \alpha^2}{\alpha \cos \varphi + \beta \sin \varphi} l.$$

» Il est facile de voir que cette formule correspond à

$$x = \frac{\gamma(\rho - \lambda H)}{\sigma + H\gamma} - \lambda - \frac{2H(\rho - \lambda H)}{H^2 + \omega^2},$$

dans le cas de la pupinisation, et à

$$x = \omega^2 \gamma - H\sigma - \frac{(\sigma + H\gamma)(H\rho + \omega^2 \lambda)}{\rho - \lambda H}$$

dans le cas des shunts inductifs.

» On retrouve ainsi, par une voie rigoureuse, sans faire jusqu'à la fin aucune approximation, les formules que l'on aurait obtenues en supposant la ligne assimilable à une ligne uniforme.

» On peut, de plus, voir, en comparant à l'expression exacte, si l'approximation est valable ou non.

» En particulier dans le cas de la pupinisation, il est évident que, lorsque σ et H sont nuls, on n'a plus le droit de négliger au dénominateur les termes d'ordre supérieur : ce qui revient à dire que, même quand la perte de la ligne et la résistance effective des bobines sont nulles, la self optima n'est pas infinie, tant que les bobines ne sont pas exactement juxtaposées. On retrouve le résultat connu, à savoir que plus la self est élevée, plus on doit rapprocher les bobines l'une de l'autre.

» Si au contraire βl est très grand, l'équation (14) se simplifie beaucoup et l'on trouve

$$(14') \quad x = -\frac{\cos \varphi}{B}.$$

» La valeur de $\operatorname{ch}^2 \beta_1$ correspondant au minimum s'obtient facilement :

$$\operatorname{ch}^2 \beta_1 = \operatorname{ch}^2 \beta l \sin^2 \varphi + \cos^2 \alpha l \cos^2 \varphi,$$

d'où

$$\operatorname{sh}^2 \beta_1 = \operatorname{sh}^2 \beta l \sin^2 \varphi - \sin^2 \alpha l \cos^2 \varphi;$$

expression qui devient, lorsque la ligne est courte,

$$\operatorname{sh}^2 \beta_1 = \beta^2 \sin^2 \varphi - \alpha^2 \cos^2 \varphi$$

et, lorsqu'elle est très longue,

$$\operatorname{sh}^2 \beta_1 = e^{2\beta'} \sin^2 \varphi$$

ou

$$\operatorname{sh} \beta_1 = e^{\beta'} \sin \varphi.$$

» On remarque que le coefficient B a complètement disparu de la formule et que les lignes trigonométriques de φ n'interviennent qu'au carré. Or, pour une même valeur du facteur $H = \frac{R}{L}$ des bobines, la valeur de l'angle φ est dans le cas des bobines en dérivation égale et de sens contraire à la valeur correspondante dans le cas des bobines en série ⁽¹⁾. Donc :

» *L'affaiblissement minimum que l'on peut obtenir pour un courant de fréquence donnée en intercalant sur une ligne donnée, à des distances l les unes des autres, des bobines, dont le rapport $\frac{R}{L}$ est supposé constant, est le même, que ces bobines soient placées en série ou en dérivation.*

» Ce résultat peut paraître étonnant : en effet, si l'on applique aux bobines en dérivation les mêmes raisonnements que Pupin, Breisig ont appliqués à l'étude des bobines en série, on serait tenté de conclure que, par suite de la longueur d'onde plus grande, il y a moins d'inconvénient à écarter davantage les bobines les unes des autres dans le cas des shunts. Voici comment on peut, croyons-nous, expliquer cette anomalie apparente.

» Les équations (13') ou (13'') peuvent se transformer comme on le verra plus loin en équations donnant la valeur de $\operatorname{sh}^2 \frac{AL}{2}$. Si l'on se contente de prendre, dans le second membre de ces équations, les termes du premier et du second degré en al , on obtient

⁽¹⁾ En effet, dans le cas des bobines en série (13'), $\varphi = \arg. \text{ de } r - \arg. \text{ de } Z$. Dans le cas des bobines en dérivation (13''), $\varphi = \arg. \text{ de } Z - \arg. \text{ de } p$. Or si H est le même, $\arg. \text{ de } p = \arg. \text{ de } r$.

des expressions qui, pour les valeurs optima de la self dans le cas des bobines en série, ont un module assez grand et un argument voisin de π , tandis que, dans le cas des bobines en dérivation, le module est très petit et l'argument inférieur à $\frac{\pi}{2}$. On conçoit donc que, dans ce dernier cas, les termes de degré supérieur qui, eux, ne sont pas réduits comme les premiers par l'effet de résonance, ne soient plus négligeables et que, par suite, les considérations développées par Pupin et Breisig, dans le cas des lignes pupinisées, ne soient pas applicables ici.

» Revenons maintenant à l'équation générale qui peut s'écrire

$$(13') \quad 2 \operatorname{sh}^2 \frac{AL}{2} = \frac{r}{p} + 2 \operatorname{sh}^2 \frac{al}{2} \left(1 + \frac{r}{p} \right) + \frac{\operatorname{sh} al}{2} \left[\frac{Z}{p} + \frac{r}{Z} \left(2 + \frac{r}{p} \right) \right].$$

» Nous supposons al ⁽¹⁾ assez petit pour que les termes en $a^3 l^3$ soient négligeables dans le développement de $\operatorname{sh} al$ et $\operatorname{ch} al$; il ne s'ensuit pas nécessairement que ces termes soient négligeables dans le second membre de l'équation (13).

» Si le vecteur représentant les premiers termes a un argument voisin de π et si le vecteur ρV résultant des termes en $a^3 l^3$, ... est sensiblement perpendiculaire à OV , ce vecteur peut influencer fortement sur l'angle OVx et, par suite, sur la partie réelle de $\operatorname{sh} \frac{AL}{2}$. Toutefois, à condition de ne pas chercher à en tirer de conclusion précise relative aux règles de distribution des impédances le long de la ligne, on peut toujours supposer l assez petit pour que cet effet soit négligeable.

» Pour qu'on puisse confondre ensuite $\operatorname{sh}^2 \frac{AL}{2}$ avec $\frac{A^2 L^2}{4}$, il faut que le second membre de l'équation (13') soit petit; ceci suppose avant tout que $\frac{r}{p}$ soit petit ⁽²⁾, et ensuite que r soit également

(1) Nous n'avons naturellement pas la prétention de donner de solution générale au problème qui, dans le cas particulier de la pupinisation, est déjà, comme on sait, extrêmement compliqué, nous voulons seulement exposer en quelques mots l'état de la question.

(2) On pourrait bien aussi réduire le coefficient de $\frac{r}{p}$, mais cela ne conduirait à aucune solution acceptable. D'autre part les termes en $\frac{r}{p}$, r et $\frac{1}{p}$ peuvent évidemment se com-

petit et p au contraire grand. Si toutes ces conditions sont remplies,

$$\begin{aligned}
 A^2 l^2 &= \frac{2r}{p} + (\rho + i\omega\lambda)(\sigma + i\omega\gamma)l^2 \left(1 + \frac{r}{p}\right) \\
 &\quad + \frac{(\rho + i\omega\lambda)l}{p} + r \left(2 + \frac{r}{p}\right)(\sigma + i\omega\gamma)l, \\
 A^2 l^2 &= [(\rho + i\omega\lambda)l + 2r] \left[(\sigma + i\omega\gamma)l + \frac{1}{p}\right] + \frac{r}{p}(\sigma + i\omega\gamma)l[(\rho + i\omega\lambda)l + r] \\
 &= A'^2 l^2 + \frac{r}{p}(\sigma + i\omega\gamma)l[(\rho + i\omega\lambda)l + r].
 \end{aligned}$$

» La première partie du second membre est le coefficient $A'^2 l^2$ qu'on aurait obtenu en assimilant l'ensemble considéré à une ligne uniforme ayant en série l'impédance $(\rho + i\omega\lambda)l + 2r$ et en dérivation l'admittance $(\sigma + i\omega\gamma)l + \frac{1}{p}$. On voit donc que cette assimilation n'est pas légitime en toute rigueur.

» Quand il s'agit d'une impédance en dérivation, le terme correctif est nul. Dans le cas de la pupinisation, les bobines ont une perte S et une capacité C , d'ailleurs faibles :

$$p \text{ est ici égal à } \frac{1}{S + i\omega C}.$$

Dans ce cas le vecteur $A'^2 l^2$ a un argument voisin de π , puisque l'argument de chacun des vecteurs dont il est le produit est voisin de $\frac{\pi}{2}$. Le vecteur OT représentant $A'l'$ sera voisin de l'axe Oy (fig. 6) et le coefficient d'affaiblissement, égal à tT , sera, toutes

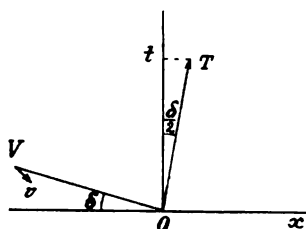


Fig. 6.

choses égales d'ailleurs, proportionnel à l'angle δ . Or r et p ont

penser dans des cas particuliers; mais pour la solution générale il faut que l'ensemble de ces termes arrive à un module inférieur à 0,3 environ pour qu'on puisse confondre pratiquement $sh\alpha l$ avec αl .

en pratique des arguments voisins de $\frac{\pi}{2}$, ainsi que

$$(\sigma + i\omega\gamma)l \quad \text{et} \quad (\rho + i\omega\lambda)l + r:$$

le vecteur correctif $V\varphi$ sera donc dirigé vers la droite et le bas; il fera avec l'axe des x un angle très petit, quoique généralement supérieur à δ , soit $V\varphi$: dans ces conditions, son adjonction, qui ne peut jamais influencer que faiblement sur la grandeur OV , puisque $\frac{r}{p}$ est toujours petit, influera également peu sur l'angle δ et par suite sur tT .

» On pourra en somme confondre $A'^2 l^2$ avec $A^2 l^2$ toutes les fois que les conditions suivantes : faible inclinaison de OV sur l'axe des x et forte inclinaison de $V\varphi$ ne seront pas satisfaites simultanément; ces deux circonstances ne seront évidemment réunies qu'exceptionnellement, et, sous réserve de vérifications dans chaque cas, l'identification de $A^2 l^2$ et $A'^2 l^2$ peut être admise en général. (On suppose toujours naturellement que p est suffisamment petit.)

» Rappelons brièvement à quels résultats conduit cette identification.

» Dans le cas de la pupinisation, si l'on choisit la loi de variation telle que la résistance R des bobines reste proportionnelle à leur self L , $R = HL$ (ce qui est vérifié quand on prend des bobines données qu'on rapproche ou éloigne plus ou moins les unes des autres), on trouve que l'affaiblissement minimum β_m est obtenu pour la valeur λ_m indiquée plus haut et que

$$\beta_m = \sqrt{(\rho - \lambda H)(\sigma + H\gamma) \frac{\omega^2}{H^2 + \omega^2}}.$$

» Si l'on tient compte de la capacité des bobines et non de la self propre de la ligne (en pratique on n'a pas à tenir compte simultanément des deux), la self optima est donnée par l'équation

$$2HK^2\lambda_m^3 + 3H\gamma K\lambda_m^2 + \lambda_m\gamma(H\gamma + \sigma - K\rho) - \rho\gamma^2 = 0,$$

dans laquelle K représente la capacité des bobines par unité de

self ramenée au kilomètre de ligne ⁽¹⁾ et le coefficient d'affaiblissement minimum β_m est augmenté.

» Dans le cas des impédances en dérivation, on peut en toute rigueur faire $r = 0$. On peut chercher la self optima de la même façon que pour les bobines en série, on trouve

$$\frac{1}{\lambda_m} = \omega^2 \gamma - H\sigma - \frac{(\sigma + H\gamma)(H\rho + \omega^2 \lambda)}{\rho - \lambda H};$$

β_m est le même que dans le cas de la pupinisation, ainsi qu'il a été dit plus haut.

» Dans le cas général, en posant $r = R_s + i\omega L_s$ et $\frac{1}{p} = S - iK$, on obtient comme valeur approximative du coefficient d'affaiblissement de l'ensemble considéré

$$\beta_l = \sqrt{\frac{(\rho l + R_s)(\sigma l + S) - (\omega \gamma l - K)\omega(\lambda l + L_s)}{+ \sqrt{[(\rho l + R_s)^2 + \omega^2(\lambda l + L_s)^2][(\sigma + S)^2 + (\omega \gamma l - K)^2]}}}$$

» On peut poser $L_s = Ll$, $R_s = H Ll$, $S = \Sigma Ll$, $K = X Ll$, et en supposant H , Σ , X constants, trouver la valeur de L qui rend β minimum. Si l'on fait le calcul approximatif en supposant que l'impédance en série et l'impédance en dérivation puissent varier indépendamment l'une de l'autre, on trouve qu'on pourrait obtenir ainsi un coefficient β_m meilleur qu'avec, soit la pupinisation, soit les impédances en dérivation seules; mais l'avantage par rapport à la pupinisation serait faible, le prix élevé, le montage compliqué, en sorte qu'en l'état actuel des choses, le problème présente peu d'intérêt.

» Un cas particulier intéressant est celui des transformateurs à enroulements égaux. Si on les suppose sans pertes magnétiques, $L_0 = L = M$; les équations (12) et (12') montrent alors que

$$S = 0, \quad K = \frac{i}{M\omega}, \quad L_s = 0, \quad R_s = R_0 = R.$$

(¹) On suppose bien entendu que la capacité des bobines varie, comme on l'a supposé pour la résistance, proportionnellement à leur self.

» Si, de plus, $M \omega l$ est suffisamment grand, on peut écrire

$$\beta = \sqrt{\frac{(\rho l + R)\sigma - \left(\omega\gamma - \frac{1}{M\omega}\right)\omega l + \sqrt{[(\rho l + R)^2 + \omega^2 \lambda^2] \left[\sigma^2 + \left(\omega\gamma - \frac{1}{M\omega}\right)^2\right]}}{2}}$$

» En posant $R = HM$, β devient une fonction de M seul dont on peut trouver le minimum. La recherche n'aurait là encore qu'un intérêt pratique faible, car une installation pareille compliquerait beaucoup la transmission des signaux, et rendrait plus difficile la recherche des dérangements; de plus on a supposé qu'il n'y avait pas de pertes magnétiques; s'il y en a, l'expression devient plus compliquée et la valeur de la self optima déterminée par l'équation précédente peut être sensiblement modifiée.

» Si la résistance est négligeable, le problème se ramène à celui des shunts inductifs dans le cas où $H = 0$. Alors

$$\frac{1}{M_{\text{optima}}} = \omega^2 \frac{\gamma \rho - \lambda \sigma}{\rho} \quad \text{et} \quad \beta_m = \sqrt{\rho \sigma},$$

on obtient donc l'affaiblissement minimum correspondant à une résistance et à une perte donnée sur une ligne : les transformateurs, quand les pertes magnétiques et la résistance effective des enroulements sont suffisamment faibles, peuvent donc donner à l'audition une amélioration comparable à celle qu'apporte la pupinisation, mais avec une déformation en général supérieure.

» B. *Réflexions entre un système d'impédance en H et deux lignes longues.* — L'équation se déduit immédiatement de l'équation (7') si l'on y remplace les cosinus et sinus hyperboliques de $a'l'$, ainsi que Z_1 et Z_2 par leurs valeurs en fonction de r , r' et p

$$(15) \quad e^R = \frac{1}{2} \left[\sqrt{\frac{Z''}{Z}} \left(1 + \frac{r}{p}\right) + \sqrt{\frac{Z}{Z''}} \left(1 + \frac{r'}{p}\right) + \frac{r + r' + \frac{rr'}{p}}{\sqrt{ZZ''}} + \frac{\sqrt{ZZ''}}{p} \right].$$

» 1° Cas d'une simple impédance en dérivation : $r = r' = 0$,

$$(16) \quad e^R = \frac{1}{2} \left[\sqrt{\frac{Z''}{Z}} + \sqrt{\frac{Z}{Z''}} + \frac{\sqrt{ZZ''}}{p} \right].$$

» Si $Z = Z''$, $e^n = 1 + \frac{Z}{2\rho}$, et si $\frac{Z}{2\rho}$ est petit, $R = \frac{Z}{2\rho}$.

» Dans l'expression (16), posons $Z = Z_1 e^{i\psi}$, $Z'' = Z'_1 e^{i\varphi}$, $p = x e^{i\xi}$.
Le module de e^{2n} est égal à

$$\frac{Z_1}{Z'_1} + \frac{Z'_1}{Z_1} + 2 \cos(\varphi - \psi) + \frac{Z_1 Z'_1}{x^2} + \frac{2}{x} [(Z_1 \cos(\psi - \xi) + Z'_1 \cos(\varphi - \xi))].$$

» Cette expression considérée comme fonction de x est minima quand

$$(17) \quad x = \frac{-Z_1 Z'_1}{Z_1 \cos(\psi - \xi) + Z'_1 \cos(\varphi - \xi)}$$

» La valeur de x devant être positive, il faut que le dénominateur soit négatif : si cette condition n'est pas remplie, l'introduction d'une impédance en dérivation ne peut que nuire à l'audition : elle sera d'autant plus fâcheuse que x sera plus petit et $\psi - \xi$ et $\varphi - \xi$ plus petits.

» Si au contraire le dénominateur du second terme de l'équation (17) est négatif, ce qui suppose que l'un au moins des angles $\psi - \xi$ et $\varphi - \xi$ soit supérieur à $\frac{\pi}{2}$, le shunt produit un effet favorable et l'affaiblissement est tel que

$$(18) \quad |e^{2n}| = \frac{1}{4} \left\{ \frac{Z_1}{Z'_1} \sin^2(\psi - \xi) + \frac{Z'_1}{Z_1} \sin^2(\varphi - \xi) + 2 [\cos(\varphi - \psi) - \cos(\varphi - \xi) \cos(\psi - \xi)] \right\}.$$

» Dans le cas où il s'agit de lignes uniformes, les deux angles $\varphi - \xi$ et $\psi - \xi$ ne pourront dépasser 135° (ceci correspond au cas où p est une self pure et où Z et Z'' sont les impédances caractéristiques de deux câbles sans self appréciable). Dans ce cas limite, on peut voir que l'intercalation de l'impédance diminue le coefficient d'affaiblissement de 0,34.

» Quand $Z_1 = Z'_1$ les équations (17) et (18) deviennent

$$x = \frac{-Z_1}{2 \cos(\varphi - \xi)} \quad \text{et} \quad e^n = \sin(\varphi - \xi).$$

» La traversée des petits bureaux téléphoniques dans lesquels les câbles intérieurs sont très courts peut être considérée comme

n'introduisant que l'impédance de l'annonceur de fin placé en shunt. D'après ce qui précède, il y a toujours intérêt, au point de vue de l'audition, à augmenter le rapport $\frac{L}{R}$ de cet annonceur.

Quand le bureau est placé entre une ligne aérienne ou pupinisée et un appareil téléphonique qui est toujours à forte impédance (de 1000 à 2000 ohms), l'intercalation de l'annonceur ne peut qu'affaiblir et il y a intérêt à augmenter le plus possible son impédance. Quand le bureau est placé entre deux lignes aériennes ou pupinisées, si l'annonceur de fin pouvait avoir une constante de temps $\frac{L}{R}$ très forte, l'effet de l'annonceur serait presque nul même si son impédance n'était pas extrêmement grande. Il y a donc autant d'intérêt dans ce cas à accroître $\frac{L}{R}$ qu'à augmenter le module $\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$. Si l'une des deux lignes et à plus forte raison les deux entre lesquelles est placé le bureau sont des lignes souterraines longues ou des lignes aéro-souterraines pour lesquelles l'impédance caractéristique ait un argument égal ou supérieur à 45° , on peut facilement se trouver dans les conditions du minimum; il y a donc intérêt à augmenter le plus possible $\frac{L}{R}$, mais non pas $\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$.

» Cet effet explique peut-être pourquoi on a constaté assez souvent qu'à affaiblissement égal une ligne souterraine permettait une conversation à longue distance mieux qu'une ligne aérienne bien isolée et à l'abri de tout trouble : par exemple on se comprend en général mieux entre Versailles et Nice par l'intermédiaire d'un fil souterrain non pupinisé entre Paris et Versailles qu'entre Lille et Nice par l'intermédiaire du circuit Paris-Lille ayant le même affaiblissement que Paris-Versailles; cette action du shunt s'ajoute aussi à l'effet des autres réflexions pour réduire l'avantage que procure la pupinisation des lignes souterraines.

» La généralisation de l'emploi des câbles à self augmentée pour le départ des lignes interurbaines, pour les lignes suburbaines et auxiliaires longues, diminuera beaucoup l'importance pratique du dernier cas considéré. On peut dire en somme que pour les petits bureaux il y a le plus souvent avantage et en tous cas il

n'y a jamais d'inconvénient grave à augmenter le plus possible à la fois $\frac{L}{R}$ et $\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$.

» Dans les bureaux plus importants, le nombre d'appareils placés sur les lignes et la longueur des câbles intérieurs changent tout à fait le problème. Il peut arriver que le développement du multiplage introduise en dérivation sur la ligne une capacité dont l'influence devienne prépondérante. L'effet produit par ces bureaux devra donc être particulièrement fâcheux pour les lignes souterraines ou aéro-souterraines considérées ci-dessus : il sera d'ailleurs toujours défectueux. L'étude complète demanderait la discussion de l'équation (15) et conduirait à des résultats sans doute très différents suivant les spécifications ; toutefois on peut dire qu'il y aura toujours intérêt à diminuer la résistance du multiplage, sa capacité et sa perte : nous allons voir de plus qu'il peut être bon de placer des selfs en série.

» 2^o Cas d'une impédance en série : p est infini, $r + r' = R_i$.

$$(19) \quad e^R = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{Z}{Z''}} + \sqrt{\frac{Z''}{Z}} + \frac{R_i}{\sqrt{ZZ''}} \right).$$

» Le terme $\frac{R_i}{\sqrt{ZZ''}}$ remplace ici le terme $\frac{\sqrt{ZZ''}}{p}$ de l'équation (16).

» Si l'on emploie pour Z et Z'' les mêmes notations que ci-dessus et si l'on pose $R_i = ye''$, on trouve que e^R est minimum pour

$$y = - [Z_1 \cos(\varphi - \theta) + Z_1'' \cos(\psi - \theta)].$$

» Là encore, pour qu'il y ait minimum, il faut qu'au moins l'un des deux angles $\varphi - \theta$ et $\psi - \theta$ soit plus grand que $\frac{\pi}{2}$. Dans ce cas, l'introduction d'une impédance en série pourra être favorable à l'audition. Toutes les conditions précédemment formulées dans le cas de la self en dérivation s'appliquent ici, à cette différence près que les variations de y sont en sens inverse de celles de x : il faudra donc que les impédances en série soient faibles, sauf lorsqu'il s'agira de prolonger des lignes souterraines ou aéro-souterraines : dans tous les cas il faudra que $\frac{L}{R}$ soit le plus grand possible.

» 3^o Cas d'un transformateur.

» On a vu qu'un transformateur à résistance ohmique et à perte magnétique nulles peut être assimilé à une self sans résistance ohmique placée en dérivation entre les deux fils de ligne : il améliorerait donc l'audition. Dans le cas général où il y a perte magnétique et résistance, l'expression de e^n s'écrit

$$\frac{1}{2M\omega i} \left[\sqrt{\frac{Z''}{Z}} (R_0 + iL_0\omega) + \sqrt{\frac{Z}{Z''}} (R_1 + iL_1\omega) + \frac{(R_1 + iL_1\omega)(R_0 + iL_0\omega) + M^2\omega^2}{\sqrt{ZZ''}} + \sqrt{ZZ''} \right]$$

ou encore

$$\frac{\sqrt{ZZ''}}{2M\omega i} \left[1 + \frac{R_0 + iL_0\omega}{Z} + \frac{R_1 + iL_1\omega}{Z''} + \frac{(R_1 + iL_1\omega)(R_0 + iL_0\omega) + M^2\omega^2}{ZZ''} \right].$$

» On peut calculer le module de cette expression, et, prenant comme variable le rapport de transformation n , on peut poser

$$L_0 = Mn + l_0,$$

$$L_1 = \frac{M}{n} + l_1,$$

et supposer l_0 et l_1 constants quand n varie. L'expression de e^n se présente sous la forme

$$e^n = \frac{A}{n} + Bn + C.$$

» Dans son Ouvrage (*Theoretische Telegraphie*) M. Breisig examine le cas où deux transformateurs se trouvent placés aux deux bouts d'une ligne; la fonction dont il arrive à chercher le minimum est $\frac{G_1^2}{n^2} + 2G_1U_1 + n^2U_1U_2$, qui devient $\left(\frac{G_1}{n} + nU_1\right)^2$ quand la ligne considérée est longue. Ici une discussion analogue peut s'entreprendre : la courbe représentant e^n dans le plan des xy est une hyperbole, asymptote à la direction définie par le coefficient $B(b' + ib'')$ et à celle définie par $A(a' + ia'')$. Il y a un minimum et l'on peut se rendre compte que, lorsque n varie autour de ce minimum, e^n varie peu : c'est le cas qui se produit pour le minimum de l'affaiblissement obtenu par la pupinisation; on peut faire varier la self assez loin de la self optima sans beaucoup augmenter l'affaiblissement minimum; cette faible sensibilité des trans-

formateurs à la variation du rapport n est évidemment un de leurs avantages, de même que la faible sensibilité de l'affaiblissement des lignes pupinisées aux variations de la self constitue une de leurs supériorités sur les lignes à shunts inductifs. »

M. P. JANET. — « Je désirerais faire deux observations au sujet de la très intéressante Communication de M. Cahen. La première est relative à l'emploi des fonctions hyperboliques de variables complexes qui est d'un usage si commode dans l'étude de toutes les questions relatives aux lignes présentant de la capacité, de la self-induction et des fuites uniformément réparties. A cette occasion, je tiens à signaler l'existence de très belles Tables numériques des fonctions hyperboliques de variables complexes dues à notre collègue et ami de l'*American Institute of Electrical Engineers*, M. le Dr Kennelly, les Tables sont accompagnées d'un atlas permettant de faire graphiquement toutes les interpolations nécessaires. J'estime qu'il y a un grand intérêt à répandre dans l'enseignement ces méthodes de calcul.

» En second lieu, M. Cahen nous a fait observer que, lorsque la ligne étudiée alimentait des appareils par l'intermédiaire de transformateurs, il devait négliger dans ses calculs l'hystérésis de ces transformateurs. A ce propos, je désire rappeler une méthode approximative, que Potier a préconisée autrefois pour tenir compte de l'hystérésis dans des circonstances analogues ⁽¹⁾; si l'on considère un transformateur à circuit secondaire ouvert, sans fuite, et dont la résistance primaire est négligeable, on peut dans une première approximation admettre que le déphasage φ observé aux bornes du primaire entre la tension et le courant est sensiblement indépendant de la fréquence, ce qui conduit à attribuer à l'appareil une résistance fictive proportionnelle à la fréquence. Moyennant cette hypothèse, on voit facilement qu'on retrouve à peu près les lois de l'hystérésis (avec le coefficient 2 au lieu du coefficient 1,6 de la loi de Steinmetz). Le moyen le plus simple d'introduire cette hypothèse dans les calculs consiste à attribuer à la bobine un coefficient de self-induction imaginaire, de la forme $L - jk$; de

⁽¹⁾ *Bulletin de la Société internationale des Électriciens*, 1894, p. 248.

sorte que sa réactance serait $j\omega(L - jk) = k\omega + jL\omega$. Tout se passerait donc comme si la bobine avait une impédance $k\omega + jL\omega$, c'est-à-dire une résistance (réelle) $k\omega$ proportionnelle à la fréquence; le déphasage constant serait alors donné par $\tan y \frac{L\omega}{k\omega} = \frac{L}{k}$. »

M. le PRÉSIDENT. — « Je remercie vivement M. Cahen de son intéressante Communication et je le félicite de la part personnelle importante qui lui revient dans ces résultats. La question que M. Cahen vient de nous exposer est primordiale pour la téléphonie à grande distance, mais elle intéresse également d'autres cas, car tous les courants sinusoïdaux sont justiciables des formules que vous venez d'entendre, et elles ne sont pas inutiles pour les longues lignes d'énergie à courant alternatif.

» Il serait bien désirable que le cas de la période variable d'établissement du courant soit aussi avancé comme étude que celui du régime permanent, mais il faut reconnaître qu'il présente de bien plus grandes difficultés.

» Je remercie également M. Janet des considérations pleines d'intérêt qu'il vient de nous présenter. »

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES.

Tensions de décharge entre éclateurs sphériques, aux fréquences élevées, par J.-C. CLARK et H. I. RYAN (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, juin 1914).

Les auteurs décrivent une série d'expériences par eux effectuées en vue de déterminer la relation entre la tension de décharge et la longueur de l'écartement dans le cas des hautes fréquences. D'amples détails sont fournis relativement aux expériences mêmes, ainsi qu'au dispositif employé. L'étincelle passe entre des sphères de 7 inches (17.7 cm) de diamètre, les fréquences étant de 123 000, 255 000 et 612 500 $\sim$. Aux fréquences les plus basses, la tension de décharge, en kilovolts, fut trouvée égale à 45,5 fois la longueur de l'écartement, en inches (2,54 cm), plus 2. Les éclateurs à pointes ne conviennent pas pour mesurer les tensions aux fréquences élevées, parce que les pointes fondent et brûlent. Toutefois, les éclateurs à pointes déjà brûlées peuvent être utilisés. Les tensions mesurées furent d'environ la moitié des tensions correspondantes à 60 $\sim$. On employa pour les expériences une génératrice d'arc Poulsen-Federal. Le Mémoire est d'ailleurs illustré de photographies et de schémas montrant l'installation, le montage des appareils, etc.

L'éclateur sphérique pour la mesure des hautes tensions, par F.-W. PECK JR (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, juin 1914).

Pour la mesure des tensions élevées, il y a avantage, dans certains cas, à recourir à une méthode d'éclatement, laquelle permet de déterminer le point maximum de la courbe de tension. L'éclateur à pointes est impropre à cet usage, parce qu'il entraîne à de grosses corrections dues à l'humidité, etc. Avec l'éclateur sphérique, au contraire, les corrections sont simples et peuvent être rapidement calculées. Les corrections afférentes à la pression barométrique et à la température doivent toujours être appliquées. Les lois régissant ces corrections ont été étudiées pour des densités d'air comprises entre celle du niveau de la mer et celle de 18 000 pieds (5500 m) d'altitude. Une formule est donnée, permettant de calculer les courbes d'éclatement pour diverses distances des électrodes sphériques, pour diverses densités d'air, etc. En pratique, les courbes-types se rapportent à des sphères de dimensions convenables, au niveau de la mer. L'auteur observe qu'il n'y a pas lieu de calculer les courbes-types complètes lorsqu'on dispose de courbes expérimentales correctes. L'effet de la haute fréquence et des tensions impulsives sont discutées dans le Mémoire qui, en outre, décrit avec soin les précautions prises pour assurer l'efficacité des expériences ainsi que la protection des appareils.

Tensions inhérentes aux connexions en Y et en Δ , par R.-W. SORENSEN et W.-L. NEWTON (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, juin 1914).

Les auteurs considèrent les tensions pouvant exister entre les diverses parties d'un système de transformateurs connectés de différentes manières. Une série d'expériences furent exécutées au moyen d'un alternateur de 7,5 kw et de six transformateurs cuirassés de 3 kw, disposés de façon à former un système type de distribution avec transformateurs survolteurs et dévolteurs. Les tensions entre les diverses parties du système furent mesurées à l'aide d'un voltmètre électrostatique. Des essais portèrent sur le système sans charge et avec charges équilibrées et non équilibrées. Les meilleurs résultats furent ceux obtenus

avec la génératrice connectée en Y et les transformateurs tous connectés en Δ. Au point de vue du calcul et de la fabrication des transformateurs de haute tension, il n'y a pas d'avantage inhérent à l'une ou à l'autre méthode de montage, du moins tant qu'il s'agit d'un débit assez important.

Voitures à accumulateurs (Discussion) (*Am. Inst. Elect. Eng.*, avril 1914).

Il s'agit d'une discussion assez longue qu'ouvrit M. F. Ayton, appuyant avec force sur la simplicité du véhicule électrique, sur son absence de vibrations et sur son usure relativement minime. Il réclame toutefois qu'on simplifie le dispositif de la charge et que celle-ci soit, autant que possible, rendue automatique. — M. J.-W. Beauchamp estime la recette de la station centrale, provenant des voitures électriques, à £ 20 (500 fr) par voiture et par an, l'énergie étant vendue à raison de 1 d (0,10 fr) par unité. — M. S. Sladen communique des détails intéressants au sujet des voitures électriques employées par la brigade d'incendie de Londres. On a eu recours jusqu'ici à des accumulateurs au plomb d'une capacité de 200 ampères-heure pour une décharge de 6 heures. Le poids de chaque voiture est de 5 $\frac{1}{2}$ tonnes (5334 kg) et la vitesse en palier atteint 25 milles (40 km) par heure. Les frais d'entretien, non compris le salaire du mécanicien, le coût de premier établissement et celui de l'amortissement, s'élèvent à environ 1 s (1,25 fr) par mille (1,6 km) au lieu de 1 s 3 d (1,55 fr) par mille pour les voitures similaires à pétrole. Y compris les frais de premier établissement, l'amortissement et l'intérêt, le coût annuel est d'environ £ 150 (3750 fr). Les batteries au plomb n'ont donné lieu à aucun dérangement et, d'autre part, les voitures présentent l'avantage d'être plus aptes et beaucoup plus promptes aux virages. — M. A.-B. Pescatore communique des chiffres relatifs aux frais d'entretien des batteries (renouvellement du matériel seulement), lesquels varient de 1 d (0,10 fr) par mille pour une voiture de 5 cwt (254 kg) à 2 $\frac{1}{2}$ d (0,25 fr) pour un fourgon de 5 tonnes (5080 kg), ces poids répondant à un usage courant. En comprenant tout ce qui concerne la batterie, sauf les manutentions accessoires de celle-ci, les chiffres d'entretien deviennent, respectivement de 1 $\frac{1}{2}$ d (0,15 fr) et 3 $\frac{1}{2}$ d (0,35 fr). — M. H. Brazil décrit un compteur indiquant l'état de charge d'une batterie soumise à divers régimes de décharge. Cet appareil consiste en un compteur moteur à deux enroulements disposés, l'un sur un disque en aluminium mobile entre des aimants permanents, l'autre sur un disque en celluloïd mobile entre des électro-aimants excités par le courant principal. D'après ce dispositif, la vitesse de rotation est proportionnelle au débit, multiplié par un certain coefficient, lequel augmente avec le débit. Un schéma du compteur et des courbes relatives au fonctionnement de l'appareil accompagnent le Mémoire original. — M. A.-J. Makower donne des chiffres d'énergie consommée par diverses voitures et s'étend notamment sur le coût du roulement des cabs électriques en Allemagne. Ce coût est de 7 d (0,70 fr) par mille, pour une dépense d'énergie d'environ 1,1 d (0,11 fr). — M. P.-P. Wheelwright fait part de sa propre expérience sur les voitures électriques affectées au service municipal. — M. F.-J. Harding donne les résultats comparatifs de roulement d'une voiture Edison et de voitures de livraison à vapeur et à pétrole : résultats très satisfaisants. — Enfin M. Rankin décrit brièvement un appareil indiquant le degré de décharge de la batterie à des régimes de décharge variables. Cet instrument comporte deux index commandés, l'un par le courant principal, l'autre par la différence de potentiel; la décharge est complète lorsque les index coïncident.

BIBLIOGRAPHIE.

O.-D. Chwolson : Traité de Physique. — Ouvrage traduit sur les éditions russe et allemande, par E. DAVAUX. Tome V; 1^{er} fascicule. Librairie scientifique A. Hermann et fils; Paris, 1914.

Nous n'avons pas à présenter de nouveau aux lecteurs du *Bulletin* l'ouvrage de Chwolson et notre rôle doit se borner à signaler l'apparition du premier fascicule du Tome V.

Ce fascicule est consacré au champ magnétique variable. Après un rappel des principes du calcul vectoriel, l'auteur nous parle des lois de l'induction, de leurs conséquences et de leurs applications. En particulier un certain nombre de pages sont consacrées au courant alternatif.

Les derniers Chapitres sont relatifs à la théorie de Maxwell, aux fondements de la théorie électronique et au principe de relativité.

En terminant, nous ne pouvons que remercier M. Davaux de la tâche qu'il s'impose en mettant l'œuvre de Chwolson à la portée de tous les lecteurs français.

IL Y A TRENTÉ ANS.

Juin 1885. — Du phénomène de l'incandescence dans le vide, par M. FÉLIX LUCAS. — Les notations électriques, par M. E. HOSPITALIER. — Sur les lampes à incandescence du type Cruto, par M. E. DESROZIERS. — Unité électrique de résistance ou de conductibilité spécifique, par M. C. NYSTRÖM. — Nouvelle disposition de générateur électrique, par M. L. FALERO.

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ INTERNATIONALE
DES
ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Compte rendu de la réunion mensuelle du 1^{er} juillet 1915 : Admission de Membre titulaire, p. 242.
— Remarque sur un cas particulier de décharge oscillante (M. P. Janet), p. 243. -- Les compteurs d'électricité actuels (M. Ilievici), p. 245.
RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES, p. 283.
IL Y A 30 ANS, p. 287.
OUVRAGES OFFERTS, p. 288.

COMPTE RENDU
DE LA
RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du jeudi 1^{er} juillet 1915 (1).

PRÉSIDENCE DE M. BRYLINSKI.

La séance est ouverte à 17 h 35 m.

Le procès-verbal de la dernière réunion mensuelle est adopté.

Il est donné connaissance des Ouvrages offerts à la Société (*voir* p. 288) et de la demande d'admission suivante :

(1) La Société n'est pas solidaire des questions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

Hermann (Carlos), Ingénieur, Directeur de la Maison Hermann Lrd, 6, Calçada do Lavra 10, à Lisbonne (Portugal). — Présenté par MM. Brylinski et Sabourain.

Ce candidat est élu membre titulaire de la Société internationale des Électriciens.

L'ordre du jour appelle les Communications techniques.

REMARQUE SUR UN CAS PARTICULIER DE DÉCHARGE OSCILLANTE.

M. P. JANET. — « Il est bien connu ⁽¹⁾ que si les constantes du circuit de décharge d'un condensateur sont telles que la décharge soit oscillante, c'est-à-dire si l'on a

$$R_1^2 < \frac{4L_1}{C},$$

on peut toujours rendre le régime de décharge exponentiel en shuntant le conducteur principal par une conductance sans self-induction G satisfaisant à la condition

$$G > \frac{CR_1}{L_1} + 2\sqrt{\frac{C}{L_1}}.$$

» Je ne sais si l'on a remarqué que, inversement, si les constantes du circuit de décharge sont telles que la décharge soit exponentielle, c'est-à-dire si l'on a

$$R_1^2 > \frac{4L_1}{C},$$

on peut toujours rendre le régime de décharge oscillatoire en shuntant le conducteur principal par une conductance sans self-induction satisfaisant à la condition

$$\frac{CR_1}{L_1} - 2\sqrt{\frac{C}{L_1}} < G < \frac{CR_1}{L_1} + 2\sqrt{\frac{C}{L_1}}.$$

» Ainsi, contrairement à une opinion généralement reçue, l'introduction d'une certaine charge non inductive sur un réseau peut rendre oscillatoire un régime qui était primitivement exponentiel.

» Je me hâte d'ajouter que cette remarque semble n'avoir qu'un intérêt de curiosité sans grande portée pratique, parce que, avec les constantes qu'on peut attribuer usuellement aux réseaux, l'amortissement de ces régimes oscillatoires spéciaux est tellement grand que les

⁽¹⁾ Voir POTIER, *Bulletin de la Société internationale des Électriciens*, 1904, p. 329.

surtensions de résonance qu'ils pourraient entraîner ne seraient pas dangereuses. »

M. le PRÉSIDENT. — « Je remercie M. Janet de l'intéressante remarque qu'il vient de nous exposer avec sa clarté coutumière et qui est assez curieuse pour mériter notre attention, même si nous n'en voyons pas d'application pratique pour le moment. »

LES COMPTEURS D'ÉLECTRICITÉ ACTUELS.

M. ILIOVICI. — « Messieurs, parmi les nombreux types de compteurs d'électricité qui ont été imaginés et même construits, un petit nombre ont résisté à l'épreuve de la pratique. Si nous nous limitons à la France, on n'y utilise d'une façon courante que les quatre types suivants :

» I. Pour le courant continu :

» 1° Le compteur magnéto-électrique non amorti de M. O'Keenan, connu sous le nom de compteur O'K et construit par la Compagnie pour la Fabrication des Compteurs.

» 2° Les compteurs magnéto-électriques amortis, avec induit en forme de disque, construits par la Société anonyme Continentale des Compteurs, Compagnie Westinghouse, Landis et Gyr, etc.

» 3° Le compteur type Thomson, construit par la plupart des constructeurs, et son dérivé le compteur Vulcain construit par la Société anonyme Continentale, qui fabrique aussi un compteur genre Thomson.

» Ces compteurs s'emploient aussi en courant alternatif, mais exceptionnellement.

« II. Pour le courant alternatif :

» 4° Les compteurs d'induction ou à champ tournant, avec l'équipage mobile en forme de disque, dont les principaux sont : les compteurs ACT et CTA de la Compagnie des Compteurs, les compteurs Cosinus MR et CPDE de la Société anonyme Continentale, le compteur BT modèle I de la Compagnie de Construction électrique, les compteurs Japy AR et AJF, Westinghouse type N, Landis et Gyr, etc.

» Pour les circuits diphasés et triphasés on a imaginé un grand nombre de types de compteurs, dérivant du compteur d'induction à disque, mais dans lesquels on a fait des combinaisons de circuits, en

tenant compte des propriétés spéciales aux courants polyphasés (¹).

» Aujourd'hui les compteurs pour circuits polyphasés contiennent les mêmes éléments que les compteurs monophasés, ces éléments étant combinés de la façon la plus simple.

» En dehors des types indiqués, on emploie aussi en France le compteur pendulaire dit compteur « Aron ». Je ne m'occuperai pas de cet appareil, non seulement parce que ce n'est pas le moment d'en parler, mais aussi parce que je ne pense pas que ce soit le compteur de l'avenir. Cet appareil, dont le principe est très intéressant, est d'une construction compliquée, d'un étalonnage long et facilement sujet à erreur; de plus, à cause du grand nombre de connexions intérieures, on risque facilement de se tromper dans le montage. Pour ces motifs, je pense que ce type de compteur, malgré ses qualités, s'emploiera d'autant moins que les autres types se perfectionneront davantage.

» A l'étranger on emploie aussi pour le courant continu des compteurs à mercure, ampèreheuremètres et wattheuremètres, mais ces appareils, qui ont certaines qualités, ne paraissent pas devoir se répandre en France.

» Je ne parlerai pas non plus des compteurs oscillants dont la complication n'est contre-balancée par aucun avantage appréciable.

» Dans ce qui suit, je me propose d'indiquer les principaux perfectionnements apportés aux quatre types de compteurs que j'ai énumérés et aux compteurs spéciaux qui en dérivent.

I. — COMPTEUR O'K.

» Le compteur O'K est, pour ainsi dire, devenu classique. Ses caractéristiques principales n'ont pas changé dans les dernières années, mais il a reçu des applications de plus en plus étendues et variées.

» Le compteur O'K (*fig. 1*) est un petit moteur magnéto-électrique

(¹) Voir JANET, *Les Compteurs à l'Exposition de 1900* (*Bulletin de la Société internationale des Électriciens*, février 1901).

dont l'inducteur (aimant permanent de forme spéciale) et le fer de l'induit sont fixes; l'enroulement de l'induit et le collecteur tournent seuls. Dans ces conditions, si l'on néglige les frottements des pivots, des balais sur le collecteur et le couple nécessaire au mouvement d'horlogerie (quantités qu'on peut rendre négligeables ou compenser

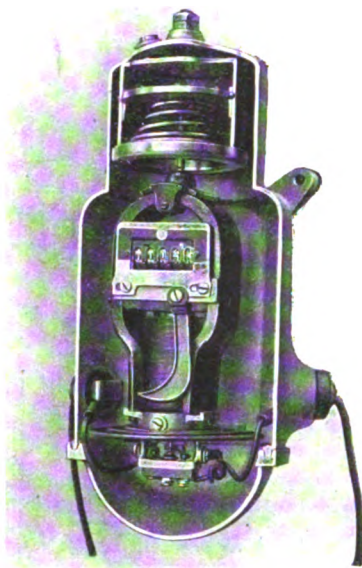


Fig. 1. — Compteur O'K suspendu pour tramways.

par des couples égaux et de signes contraires) ainsi que la ventilation de l'air, on a affaire à un moteur tournant à vide, dont la vitesse est proportionnelle à la différence de potentiel à ses bornes.

» On aurait donc ⁽¹⁾

$$(1) \quad \omega = ku,$$

ω étant la vitesse de l'induit, u la différence de potentiel à ses bornes.

⁽¹⁾ Voir, pour plus de détails sur la théorie du compteur O'K : ILIOVICI, *Méthodes et Appareils de mesures électriques et magnétiques*, troisième Partie, fascicule 22 de l'*Encyclopédie électrotechnique* (Geissler, éditeur).

En général, l'induit du compteur O'K est monté en dérivation sur un shunt, monté en série avec le circuit d'utilisation.

» Le courant passant dans l'induit est théoriquement nul, pratiquement très faible (de 0,001 à 0,002 ampère environ). On peut donc admettre que le shunt est parcouru par le courant extérieur, et l'on a

$$(2) \quad u = RI,$$

R étant la résistance du shunt, I le courant dans le circuit principal.

» De (1) et (2) on déduit

$$(3) \quad \omega = kRI,$$

d'où

$$\int_0^t \omega dt = kR \int_0^t I dt$$

ou

$$(4) \quad \alpha = kRQ,$$

α étant l'angle dont tourne l'induit pendant le temps t , Q la quantité d'électricité qui passe pendant le même temps dans le circuit d'utilisation.

» Le mouvement de l'équipage mobile se transmet, à l'aide d'une vis sans fin, à un mouvement d'horlogerie, qui pourra être gradué en *ampères-heure*. En réalité, la différence de potentiel aux bornes des circuits est pratiquement constante et connue; il en résulte que les compteurs ampèreheuremètres peuvent être gradués en watts-heure, pour une tension donnée, ce qu'on fait généralement (1).

» En réalité, l'induit du compteur O'K ne marche pas complètement à vide, la ventilation donne naissance à un couple proportionnel à la vitesse, il en est de même des courants de Foucault induits dans le support du bobinage induit, ce support étant en bronze; mais ces couples ont une faible influence sur la marche du compteur. Nous verrons d'ailleurs, à propos des ampèreheuremètres amortis, qu'ils

(1) La Compagnie des Compteurs construit aussi un type de compteur O'K dans lequel un shunt magnétique permet de faire varier le flux de l'inducteur. On peut changer ainsi les constantes de l'appareil, qui peut être réglé d'une façon très simple pour un voltage voulu, compris entre certaines limites.

n'ont pas d'influence sur la proportionnalité entre l'angle de rotation de l'induit et la quantité d'électricité.

» Les couples de frottements peuvent être rendus négligeables pour les petits calibres; au-dessus de 15 ampères, on les compense par un couple égal et de signe contraire, obtenu en introduisant dans l'induit un courant supplémentaire proportionnel à la différence de potentiel aux bornes du réseau.

» Le compteur O'K est probablement le plus répandu en France, dans les installations à courant continu. Il a un avantage très important pour les petites installations, c'est de ne consommer aucune énergie à vide, propriété qui appartient à tous les ampèreheuremètres; tandis que les wattheuremètres consomment dans leurs fils fins une énergie qui prend une grande importance dans les petites installations (de 1 à 5 ampères par exemple) qui sont le plus grand nombre.

» Le compteur O'K a encore l'avantage d'être peu influencé par les champs magnétiques extérieurs, le champ dans l'entrefer étant de plusieurs centaines de gauss, et de ne pas être sensible pratiquement aux variations de température.

» Son principal inconvénient, commun avec tous les ampèreheuremètres, c'est qu'il ne mesure l'énergie électrique, seule quantité utile à connaître dans la plupart des cas, que si le réseau a une tension constante et égale à celle pour lequel l'appareil a été gradué (¹). Mais pour les petites installations, l'erreur provenant des variations de tension du réseau est beaucoup moins importante que les erreurs inhérentes aux wattheuremètres; de plus, pour ces derniers appareils, l'énergie consommée dans le fil fin, et qui est perdue inutilement, peut, dans ces cas particuliers, être de même ordre de grandeur que celle effectivement utilisée.

» Au point de vue de la construction, il se présente dans les compteurs ampèreheuremètres une difficulté, qui leur est commune avec les compteurs Thomson : cette difficulté provient du *collecteur*. Mais le problème ne se pose pas de la même façon dans les deux types d'appareils.

(¹) La Compagnie des Compteurs construit aussi un compteur O'K wattheuremètre dit à *shuntelet*, lequel, à l'aide d'un artifice simple, mesure l'énergie électrique. Ce compteur est intéressant pour les installations importantes à courant continu.

» Dans les compteurs Thomson, on a à se préoccuper surtout des étincelles aux balais et des frottements. Dans les ampèreheuremètres et, en particulier, dans les compteurs O'K, les étincelles ne sont pas à craindre, parce que la tension aux bornes de l'induit est très faible (0,5 volt au maximum pour le O'K, 1 à 1,5 volt pour les ampèreheuremètres amortis) et le courant qui passe dans les balais excessivement faible (de l'ordre de 0,002 ampère pour le compteur O'K).

» Par contre, les frottements et les résistances de contact prennent plus d'importance, surtout pour les petits calibres, pour lesquels les frottements ne sont pas compensés.

» On fait donc le collecteur en *or*, métal donnant un bon contact pour une faible pression des balais (inférieure à 1 g par balai) et ne se salissant pas. Le collecteur a un diamètre très faible (environ 3 mm), ce qui réduit sa vitesse périphérique; il comporte trois lamelles, un nombre *impair* donnant un meilleur résultat qu'un nombre pair, ce qui est facile à comprendre, le contact étant alors plus uniforme pendant la rotation. Les balais comportent trois lamelles, dont une en or et deux en argent; ces lamelles sont indépendantes l'une de l'autre, et l'on peut ainsi obtenir facilement trois points de contact sûrs.

» La Compagnie des Compteurs a créé plusieurs modèles de compteur O'K, dont les principaux sont :

» 1^o Type Y pour les petits calibres (de 1 à 5 ampères) dont les caractéristiques sont : flux dans l'entrefer, environ 9000 maxwells; poids de l'équipage mobile, environ 78 g; couple normal, 25 g : cm environ; nombre de tours par heure pour le courant normal, environ 25000; différence de potentiel maximum aux bornes du shunt, environ 0,5 volt; résistance entre balais, environ 2,5 ohms; diamètre du collecteur, environ 3 mm; nombre de lames au collecteur, 3.

» 2^o Compteur Z, pour tous les calibres, dont les caractéristiques principales sont : flux dans l'entrefer, environ 20000 maxwells; poids de l'équipage mobile, environ 200 g; couple normal, environ 40 g : cm; nombre de tours par heure, inférieur à 15000; différence de potentiel aux bornes pour le courant normal, environ 0,5 volt.

» Pour les calibres à partir de 15 ampères les compteurs Z comportent un système de compoundage permettant de compenser le couple des frottements; ce compoundage, pris en dérivation sur la

tension du circuit d'utilisation, consomme environ 1 watt pour 100 volts.

» 3° Compteurs W pour installations à trois fils.

» 4° Compteur étalon, permettant l'étalonnage facile des autres types de compteurs à courant continu, lorsque le circuit d'étalonnage présente de trop grandes variations de courant; dans ce cas on peut remplacer l'ampèremètre par un compteur O'K.

» 5° Compteur O'K suspendu pour tramways (*fig. 1*). Ce type présente un grand intérêt. On sait l'importance qu'il y a pour les Compagnies de tramways à réduire la consommation d'énergie, surtout au démarrage et à l'arrêt. Suivant les méthodes de démarrage ou de freinage employées, suivant l'habileté plus ou moins grande du wattman, l'énergie consommée par une même voiture, dans des conditions identiques, peut varier dans de très grandes limites. On a trouvé par exemple, dans une série d'expériences, que l'écart entre wattmen peut atteindre 30 à 40 pour 100.

» D'autre part à une économie d'énergie correspond aussi une moindre usure du matériel, en particulier des sabots de freins, moins d'avaries aux moteurs, etc.

» On voit de là l'intérêt qu'il y a à se rendre compte de la consommation pour l'étude des meilleurs systèmes de contrôleurs et des meilleures méthodes de freinages, pour le contrôle de l'habileté des wattmen, etc.

» Les appareils enregistreurs (ampèremètres ou wattmètres) qu'on a essayés d'abord seraient très intéressants, parce qu'ils indiquent non seulement l'énergie consommée, mais aussi la puissance instantanée, ce qui permet de se rendre compte de la variation de cette puissance.

» On peut ainsi savoir à quelle période de la marche des tramways la puissance demandée est exagérée, et chercher la cause de cette exagération et son remède. Mais les appareils enregistreurs sont difficiles à installer sur les tramways à cause du manque de place et parce qu'il est difficile de les soustraire aux vibrations. De plus, une fois les courbes relevées il faut les planimétrer pour obtenir l'énergie (ou la quantité d'électricité) consommée, ce qui est long et souvent peu exact.

» Les compteurs sont donc plus indiqués. Les compteurs watt-

heuremètres, genre Thomson, se prêtent mal à cet usage : 1° parce qu'en général ces compteurs sont traversés par tout le courant, on est donc forcé d'introduire dans les compteurs les forts câbles d'amenée du courant, et l'appareil ne peut pas être soustrait aux vibrations de la voiture; 2° le circuit à fil fin du compteur, comportant l'induit, est soumis à une différence de potentiel d'environ 600 volts. Les secousses de la voiture font vibrer les balais et donnent des étincelles, qui mettent rapidement le collecteur hors d'usage.

» Par contre, dans les ampèreheureremètres, et en particulier dans le compteur O'K, le courant principal passe dans un shunt extérieur à l'appareil qui peut être aussi loin qu'on veut de celui-ci et auquel il est relié par deux cordons souples. Si donc on suspend bien le compteur par une suspension élastique, on peut le soustraire aux vibrations sans être gêné par la question des connexions. D'autre part, le collecteur est soumis à une différence de potentiel qui ne dépasse pas 1 volt, donc les étincelles aux balais ne peuvent pas être dangereuses (voir *fig. 1*).

» Le compteur O'K a reçu un grand nombre d'autres applications. On construit des compteurs O'K pour la charge et la décharge des accumulateurs : dans le cas le plus simple l'appareil est traversé successivement, et dans deux sens contraires, par les courants de charge et de décharge; il indique donc la quantité d'électricité consommée à la charge et son excès sur la quantité restituée à la décharge.

» De ces deux indications on peut déduire facilement le rendement, en quantité, de la batterie.

» Dans un autre type de compteur se trouve un shunt spécial (appelé *shunt à rendement*) qui est à double réglage et qui est disposé de façon qu'à la décharge l'induit tourne plus vite, pour le même courant, et de sens contraire à celui de la charge. En tenant compte du rendement connu de la batterie, on règle le shunt spécial, de façon que les aiguilles du mouvement d'horlogerie reviennent à zéro lorsque la batterie est complètement déchargée. *Ce type de compteur est très intéressant, pour les batteries utilisées d'une façon irrégulière*, ce qui est souvent le cas pour les accumulateurs à poste fixe. Il permet de se rendre compte, à chaque instant, de

l'état de décharge de la batterie. Par l'emploi d'un compteur de ce type, on éviterait de charger les accumulateurs avant qu'ils soient suffisamment déchargés; on ferait ainsi une économie d'électricité et l'on utiliserait mieux les éléments.

» D'autres types, un peu plus complexes, permettent certaines combinaisons intéressantes concernant les accumulateurs; marche en batterie tampon, batterie sur circuit à trois fils, etc.

» Une autre application intéressante du compteur O'K est la détermination de la quantité de métal déposée dans une ou plusieurs opérations de galvanoplastie.

» *Compteur O'K wattheuremètre.* — Grâce à un artifice simple, on a transformé le compteur O'K ampèreheuremètre en wattheuremètre. Ce compteur peut avoir certains avantages; en particulier, il est pratiquement insensible aux influences de la température et des champs magnétiques extérieurs et il peut être installé loin du circuit d'utilisation, parce qu'il est monté sur shunt, ce qui présente des avantages surtout pour les circuits à forts courants.

II. — COMPTEURS AMPÈREHEUREMÈTRES AMORTIS.

» Ces appareils diffèrent, en principe, du compteur O'K en ce que le mobile porte un disque qui se déplace sous l'influence de un ou de deux aimants permanents, ce qui crée un couple antagoniste proportionnel à la vitesse. En réalité, le disque sert en même temps comme support à l'induit, composé de trois bobines plates fixées sur le disque (*fig. 2*) : c'est donc le même aimant qui produit le couple actif et le couple antagoniste. Il est facile de démontrer ⁽¹⁾ que, en négligeant les frottements, la vitesse de l'induit est proportionnelle au courant traversant le shunt, comme pour le compteur O'K.

» Le fonctionnement de ces appareils diffère de celui de ce dernier compteur, surtout parce que leur vitesse est plus réduite, à cause du couple amortisseur, et que le courant dans l'induit est plus fort. La faible vitesse constitue un avantage, mais le courant relativement plus élevé présente un inconvénient, car il rend plus difficile l'entretien du collecteur. Les compteurs amortis ont généralement un équipement

(1) Voir ILIOVICI, *op. cit.*, p. 60 et suivantes.

plus léger. La légèreté de l'équipage est un avantage, parce que les pivots s'usent moins, on risque moins de les casser lors du transport ⁽¹⁾ et les couples de frottement sont plus réduits. Ce

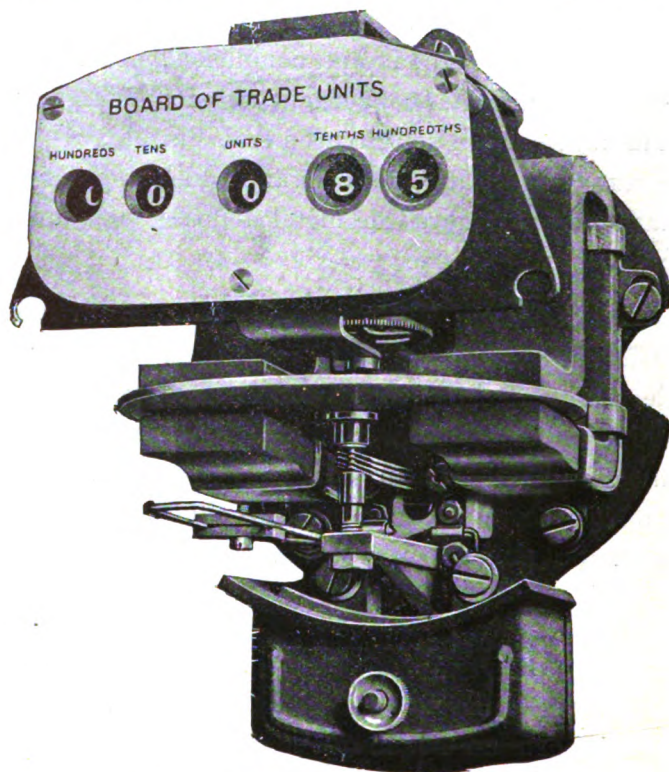


Fig. 2. — Compteur ampèreheuremètre amorti.

dernier résultat est le plus important, mais en réalité la question est plus complexe; un faible poids de l'équipage entraîne en général un plus faible couple actif, or c'est le rapport entre le couple de frottement et le couple actif qui intervient dans le fonctionnement exact des compteurs : ce rapport doit être inférieur à une certaine limite. D'autre part, dans les compteurs, il existe des couples de frottement indépendants du poids de l'équipage : dans tous les compteurs, les frottements du mouvement d'horlogerie, et, dans les compteurs, à collecteurs, les frottements des balais.

» Le premier couple a été rendu très faible, grâce aux soins

(1) Nous verrons qu'en réalité on prend le plus souvent des précautions pour que le pivot ne frotte pas sur la pierre lors du transport.

apportés dans la fabrication des mouvements d'horlogerie, et à ce point de vue l'introduction des mouvements à rouleaux ou à chiffres sauteurs ne me paraît pas constituer un progrès. On a réduit aussi le couple de frottement des balais en réduisant les dimensions du collecteur et en diminuant la pression des balais, mais on arrive à une limite (pression 0,6 g par balai) parce qu'en réduisant trop la pression on risque d'avoir de mauvais contacts et tendance vers la production d'étincelles. Or ces couples doivent être négligeables devant le couple actif, même aux faibles charges, le couple actif ne doit donc pas être trop réduit, ce qui donne une limite inférieure dans la réduction du poids.

» Nous citerons les compteurs ampèreheuremètres amortis suivants :

» 1° *Compteur A. H. M. de la Société anonyme Continentale.* — Comporte deux aimants plats, dans les entrefers desquels se déplace l'induit constitué par un disque embouti très mince en aluminium, sur lequel sont montés les enroulements.

» Ceux-ci sont au nombre de trois et ont une forme circulaire. Le collecteur, de très faible diamètre (2,5 mm environ), comporte trois lamelles en or. Chaque balai est formé d'une lamelle en or et de deux en argent. Pression des balais, environ 0,6 g. Les balais sont facilement accessibles sans qu'on ait à ouvrir le couvercle principal; un petit capot assure la protection de ces organes. Tension maxima aux bornes du shunt, 0,9 volt environ. Couple moteur normal, 25 g : cm environ. Poids de l'équipage, 50 g environ. Nombre de tours par heure, environ 13000.

» L'axe est en métal non magnétique, de façon à éviter l'attraction des aimants sur le mobile. Le pivot inférieur en acier trempé est vissé sur l'axe et très facilement remplaçable.

» 2° *Compteur ODC de la Compagnie Westinghouse (fig. 2).* — Comporte aussi un disque en aluminium se déplaçant dans les entrefers de deux aimants permanents; le collecteur est formé de trois lamelles en or; chaque balai comporte quatre lamelles, ce qui assure quatre contacts. Le couple normal est d'environ 14 g : cm; le poids de l'armature, environ 21 g; la vitesse, environ 6000 tours par heure; la tension normale aux bornes du shunt est de 0,8 volt pour les calibres de 1 à 10 ampères et de 0,4 volt pour les calibres de 20 à 200 ampères.

» 3^o *Compteur IB Landis et Gyr.* — Armature en forme de disque. Balais et collecteur en alliage de métaux précieux. Balais donnant quatre contacts et disposés de façon qu'on puisse les enlever et les remettre sans changer la pression. Couple normal d'environ 15 g : cm. Poids de l'équipage, environ 40 g. Nombre de tours par heure, environ 9000. Chute de tension normale aux bornes du shunt, 0,9 volt (résultats se rapportant à un appareil de calibre 3 ampères).

» Ces compteurs sont susceptibles des mêmes applications que le compteur O'K.

III. — COMPTEURS WATTHEUREMÈTRES, TYPE « THOMSON ».

» Le compteur Thomson est un petit moteur à collecteur, en général sans fer, dont l'induit est parcouru par un courant pratiquement proportionnel à la différence de potentiel aux bornes du circuit d'utilisation et dans l'inducteur duquel passe le courant principal (quelquefois un courant proportionnel à celui-ci).

» On obtient ainsi un *couple actif* proportionnel à la puissance dans le circuit.

» L'équipage mobile porte aussi un disque, en cuivre ou en aluminium, qui tourne dans l'entrefer d'un ou deux aimants permanents : on obtient ainsi un *couple amortisseur* proportionnel à la vitesse de rotation de l'équipage.

» On démontre ⁽¹⁾ que, dans ces conditions, si les couples de frottement sont négligeables, l'angle dont a tourné l'équipage mobile pendant un temps t est proportionnel à l'énergie consommée pendant ce temps dans le circuit sur lequel est monté le compteur.

» Dans la pratique, on s'arrange pour réduire le plus possible les couples de frottement et l'on compense ce qui reste à l'aide d'un couple actif supplémentaire, *couple de compensation* ou de *compounding*.

» Ce couple est obtenu en plaçant, à l'intérieur de l'inducteur, une bobine supplémentaire en fil fin montée en série avec l'induit; cette

(1) Voir ILIOVICI, *op. cité*, p. 63 et suiv.

bobine, en agissant sur l'induit, crée un couple supplémentaire proportionnel au carré de la différence de potentiel, donc pratiquement constant.

» Les compteurs Thomson ont subi une série de perfectionnements ayant pour but : d'améliorer leur construction mécanique, de les rendre moins encombrants; de réduire le poids de l'équipage, de diminuer la consommation du fil fin et du gros fil; d'améliorer la qualité des aimants permanents, réduire leur tendance à la désaimantation et de les rendre, par leur nature et par leurs positions, moins sensibles à l'influence des court circuits; de réduire l'importance des frottements et, par conséquent, du couple de compensation; de rendre les appareils moins sensibles à l'influence de la température et des champs magnétiques extérieurs; enfin, de rendre faciles et progressifs les différents réglages.

» Les perfectionnements, au point de vue mécanique, ont consisté à réduire le nombre de pièces, à faire venir de fonte, avec la platine du compteur, la plupart des supports des pièces essentielles. On cherche aussi à pouvoir utiliser les mêmes pièces dans plusieurs types de compteurs. Ainsi, certains constructeurs (Compagnie anonyme Continentale, Landis et Gyr, etc.) utilisent des pivots indépendants de l'arbre et les mêmes pivots servent pour tous les appareils.

» *Compensation.* — La bobine compensatrice, qui était montée sur simple support en carton, dans les premiers appareils, et introduite simplement dans les bobines inductrices auxquelles elle tenait par frottement, est, dans les compteurs actuels, bobinée sur carcasse métallique et fixée d'une façon solide. Souvent cette bobine porte tout le fil mis en série avec l'induit, et l'on évite ainsi l'emploi de bobine supplémentaire, ce qui économise de la place et de la main-d'œuvre. On a même profité de la meilleure disposition de la bobine compound pour assurer un certain réglage du couple compensateur (nous verrons les dispositions adoptées lorsque nous décrirons les principaux modèles).

» *Fermeture.* — On a perfectionné les systèmes de fermeture, qu'on a rendus plus étanches et moins déformables; les boîtes à bornes sont rendues infraudables, et même certains constructeurs (Compagnie des Compteurs, Compagnie de Construction électrique, etc.) cons-

truisent des compteurs comportant un interrupteur et un coupe-circuit bipolaires faisant partie de l'appareil. On réduit ainsi au minimum les connexions extérieures, on diminue l'encombrement du tableau, qu'on peut même supprimer complètement chez les petits abonnés.

» *Consommation.* — La consommation a été fortement réduite. Ainsi, les circuits à fils fins des premiers compteurs Thomson consumaient environ 10 watts pour 100 volts, tandis que la plupart des appareils actuels ne demandent que 1,5 watt environ pour 100 volts.

» *Aimants.* — Les aimants permanents sont en acier spécial; leur entrefer est aussi large et aussi court que possible; ils sont placés *perpendiculairement* aux lignes de force des inducteurs du compteur et le plus éloigné possible de ceux-ci; dans certains compteurs, on protège les aimants par des écrans magnétiques.

» *Frottements.* — Pour réduire les frottements des balais, on diminue le diamètre du collecteur, on réduit la vitesse de rotation de l'équipage, on rend minimum la pression des balais (environ 0,6 g par balai); les lamelles du collecteur, en argent, sont en nombre *impair*, ce qui assure plus d'uniformité dans le frottement; les balais sont aussi en argent et comportent plusieurs brins presque indépendants, ce qui permet d'obtenir autant de points de contact assurés.

» Pour être sûrs d'avoir pratiquement la même pression, certains constructeurs ont adopté des systèmes de balais permettant de les enlever et de les remettre sans changer leur pression (*voir* p. 262, *fig. 5*).

» On a essayé, dans les compteurs Thomson, de faire les lamelles du collecteur en or, comme pour les compteurs ampèreheuremètres, mais les résultats ne paraissent pas avoir été suffisants pour compenser l'augmentation de prix. Le problème, en effet, n'est pas le même dans les deux cas : dans les ampèreheuremètres, la tension aux bornes et le courant dans l'induit sont très faibles, les étincelles sont peu à craindre, mais la résistance au contact des balais doit être négligeable devant la résistance totale de l'induit, qui est de quelques ohms (environ 2,5 ohms pour le compteur O'K), l'or est donc tout indiqué, parce qu'il se maintient très propre; par contre, dans le compteur Thomson, la résistance de contact ne gêne pas, la résistance

totale du circuit de l'induit étant de plusieurs milliers d'ohms; ce qui gêne le plus, ce sont les étincelles aux balais et, à ce point de vue, l'or ne paraît pas plus avantageux que l'argent.

» *Démarrreur.* — Pour réduire encore les frottements on emploie des dispositifs spéciaux, applicables surtout aux compteurs de gros calibres, qui fonctionnent souvent à faibles charges et qui doivent être exacts même dans ces cas. Ainsi la Compagnie des Compteurs emploie, sous le nom de *démarrreur* (voir p. 262, fig. 4), un appareil composé d'un petit moteur imprimant aux balais, par l'intermédiaire d'un excentrique, un mouvement de va-et-vient, dont la vitesse propre est supérieure à la vitesse périphérique du collecteur.

» La figure 3 indique les résultats obtenus avec et sans démarrage.

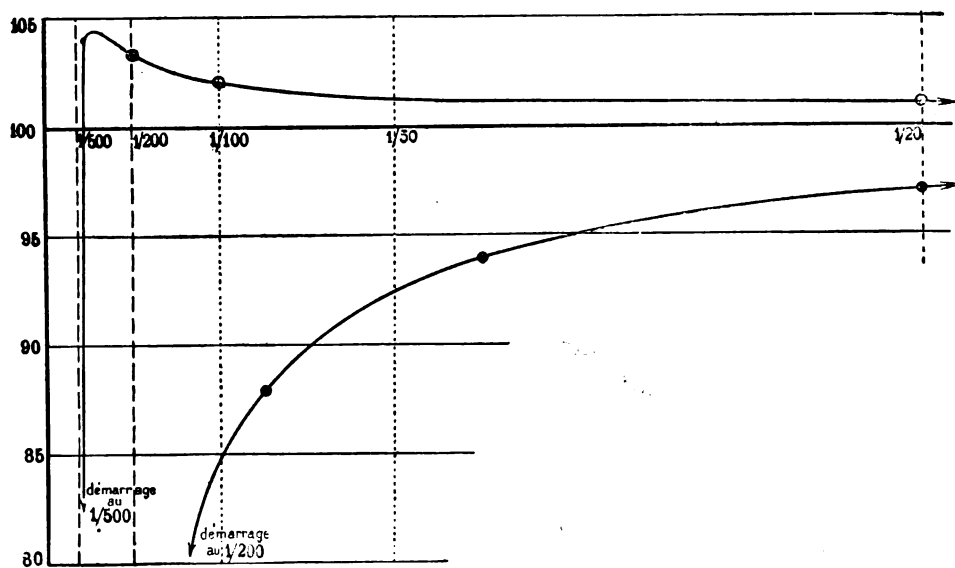


Fig. 3. — Courbes obtenues en faisant fonctionner un compteur Thomson avec et sans démarrage.

On voit qu'avec le démarrage le même compteur, qui n'était pratiquement exact qu'à partir du $\frac{1}{20}$ de la charge, le devient à partir du $\frac{1}{200}$ environ.

» *Influence de la température.* — Dans les compteurs Thomson la température agit sur le couple actif, parce que le courant dans l'induit dépend de la résistance de son circuit qui varie avec la tempéra-

ture, et sur le couple amortisseur, qui dépend de la résistance du disque, en cuivre ou en aluminium. Les actions sur les deux couples sont de même sens et, comme ils sont de signe contraire, les effets de la température se contre-balancent en parties et, théoriquement, pourraient s'annuler (¹).

» Dans la pratique il est difficile d'annuler l'influence de la température, parce que celle-ci n'est pas la même à l'endroit du disque que là où se trouve l'induit, et elle n'est pas la même lorsque le compteur est ouvert ou fermé, et suivant le courant dans les inducteurs.

» Pour réduire l'influence de la température, plusieurs solutions ont été adoptées : certains constructeurs se contentent de constituer le circuit induit en cuivre, le disque étant de la même matière; la compensation serait complète si les températures étaient les mêmes. Pour tenir compte de la différence des températures (elle est en général plus grande pour le fil de l'induit que pour le disque), certains constructeurs donnent au circuit de l'induit un coefficient de température différent de celui du disque, en constituant le fil partie en cuivre, partie en constantan et en nickel.

» Une solution meilleure est celle consistant à corriger séparément l'influence de la température sur les deux couples. Comme exemple, je citerai la solution adoptée par la Compagnie des Compteurs : le fil fin est composé en très grande partie en constantan, alliage à coefficient de température pratiquement nul. Le coefficient de température global est ainsi rendu très faible. D'autre part, le disque, d'habitude en aluminium, se déplace entre les pôles d'un aimant permanent, dont une partie de l'entrefer est fermée par une lame d'acier Guillaume, dont la perméabilité diminue lorsque la température augmente. Cette lame en acier crée une dérivation magnétique, qui réduit le flux dans la partie de l'entrefer dans laquelle se déplace le disque. Lorsque la température augmente la diminution de la perméabilité réduit l'importance de la dérivation magnétique, le flux utile augmente et tend à augmenter le couple amortisseur, tandis que l'augmentation de la résistance du disque

(¹) Voir ILIOVICI, *op. cit.*, p. 69. Voir aussi : A. DURAND, *Le Compteur électrique* [Tema n° 18 (Congresso internazionale delle Applicazioni elettriche. Torino, 10-17 settembre 1911)].

tend à produire un effet contraire. Pour un réglage approprié on arrive à rendre les deux effets équivalents dans les limites de températures habituelles.

» *Réglages.* — On a perfectionné et rendu rapides et progressifs tous les moyens de réglage. Dans certains compteurs les aimants ont une position fixe et l'on règle leur effet en créant une dérivation magnétique à l'aide d'un shunt à position variable; dans d'autres, au contraire, on change la position des aimants, soit par une translation, soit par une rotation autour d'un axe vertical. Dans les deux cas, la variation est rendue progressive par un dispositif approprié.

» *Crapaudine et pivots.* — Ces parties essentielles ont été perfectionnées comme les autres. Les pivots sont de meilleure qualité et tournent sur une pierre fine (saphir ou rubis) portée par une crapaudine à ressort. Les précautions à prendre lors du transport sont simplifiées. Par exemple, dans les appareils de la Compagnie anonyme Continentale, la crapaudine porte une petite douille, qui se soulève dès qu'on dévisse la crapaudine et presse l'équipage contre le pivot supérieur. L'équipage est ainsi bloqué et le pivot ne porte plus sur la pierre; il suffit, une fois l'appareil en place, de revisser la crapaudine pour que l'équipage reprenne automatiquement sa position normale.

» Dans les compteurs de la Compagnie des Compteurs, il suffit de dévisser la crapaudine et de la revisser après l'avoir retournée; dans cette position l'équipage est bloqué en même temps que le pivot est protégé.

» *Équipages astatiques.* — Enfin, pour réduire l'influence des champs magnétiques voisins, certains constructeurs emploient des équipages mobiles astatiques (Compagnie des Compteurs, etc.).

» *Description sommaire de quelques appareils.* — 1° La Compagnie des Compteurs construit plusieurs types de compteurs dynamo-électriques, dont les plus importants sont :

» *a. Modèle B (fig. 4).* — Dans cet appareil l'induit a la forme d'un disque et est bobiné de façon à constituer un *système astatique*. Les inducteurs sont à axes verticaux et portés par des carcasses métal-

liques, ce qui les rend indéformables en cas de court circuit. Les balais sont à dispositif indéréglable. La figure 5 fait facilement com-

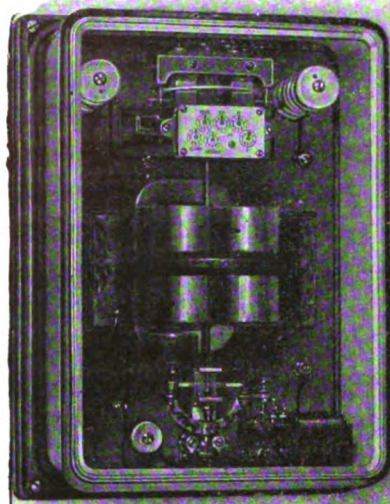


Fig. 4. — Compteur modèle B, gros calibre, avec démarreur.

prendre ce dispositif. Sur la figure un des balais est en place et le balai droit sorti de son porte-balai.

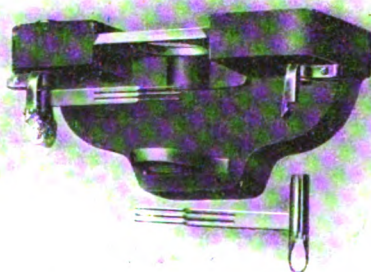


Fig. 5. — Dispositif pour balais indéréglables.

» Le disque amortisseur est en aluminium. Il se trouve à la partie supérieure de l'appareil et suffisamment éloigné des inducteurs. Il se déplace dans les entrefers de deux aimants permanents, l'action de

l'un d'eux étant réglable à l'aide d'un shunt magnétique : ce shunt se compose d'une plaque en fer dans laquelle se trouvent vissées deux vis en fer doux : en rapprochant les vis des pôles des aimants on augmente les dérivations magnétiques, ce qui réduit le flux utile. La partie inférieure de la plaque sert aussi comme écran magnétique.

» Le couple de compoundage est réglable à l'aide d'une petite tige en fer doux qu'on enfonce plus ou moins dans la bobine compensatrice.

» Poids de l'équipage mobile, environ 150 g. Couple actif 8 à 12 g : cm environ. Consommation du fil fin, 2,5 watts pour 100 volts. Vitesse en régime normale, 60 à 80 t : m environ. Ampères-tours inducteurs, pour courant normal, 1300 à 2000 suivant le calibre. Volts aux bornes des inducteurs, pour le courant normal, 1,2 pour 5 ampères à 0,5 volt pour 30 ampères. Consommation du gros fil pour le courant normal, 6 à 15 watts suivant le calibre. Ce compteur est construit pour toutes les intensités et les tensions pratiques et pour circuits à 2, 3 ou 5 fils. Pour les forts calibres on construit aussi des appareils à shunt et on les combine aussi avec un démarreur (*fig. 4*).

» *b. Modèle C.* — Se construit surtout pour les faibles courants, de 2 à 10 ampères. Il est caractérisé par un faible poids de l'équipage mobile (inférieur à 125 g) qui a la forme d'un tambour, par un fort couple actif (8 à 15 g : cm suivant le calibre) et une faible consommation (1,5 watt pour 100 volts).

» Le collecteur compte cinq lamelles en argent. Le disque est en aluminium et se déplace entre les pôles d'un aimant, dont le flux utile est réglé à l'aide d'un shunt magnétique. Celui-ci est formé d'une serpette, qui peut tourner autour d'un axe horizontal. Un deuxième shunt magnétique fixe, en acier Guillaume, annule l'influence de la température sur le couple amortisseur. L'aimant est protégé par un écran magnétique contre l'action des lignes de force de l'inducteur.

» La résistance additionnelle, en constantan, est montée en entier sur la bobine compensatrice; l'action de celle-ci est réglée à l'aide de deux fers en forme de demi-cylindres dont l'un est fixe et l'autre glisse à l'intérieur du premier.

» 2° *La Compagnie anonyme Continentale* construit le compteur

Vulcain, qui diffère du Thomson en ce que le disque amortisseur est remplacé par un cylindre, et des compteurs genre Thomson.

» Dans les anciens compteurs Vulcain l'amortissement était fourni par l'action sur le cylindre de plusieurs petits aimants permanents qui se désaimantaient trop facilement. Dans les compteurs récents on les a remplacés par quatre gros aimants de forme et de qualité bien étudiées pour conserver leur aimantation et assez éloignés des inducteurs pour ne pas subir l'influence de ses lignes de force.

» Le compteur type F de cette Compagnie a été étudié surtout pour les faibles calibres, de 2 à 15 ampères, et il est d'un faible encombrement. L'induit est composé de trois bobines à 120° , le collecteur de tout petit diamètre est formé de trois lames en argent. Le couple actif pour le courant normal varie de 3,5 à 7 g : cm environ, suivant le calibre. La pression des balais est d'environ 0,6 g par balai. Le disque est en aluminium.

» Les balais sont accessibles sans qu'on ait à enlever le couvercle principal.

» La crapaudine comporte un système de blocage de l'équipage dont nous avons parlé page 261.

» 3° *Le compteur de la Compagnie Westinghouse* comporte un induit formé de trois bobines à 120° . Ces trois bobines ont trois extrémités soudées ensemble, les trois autres étant reliées aux lamelles d'un tout petit collecteur. Chaque bobine a 1000 spires en fil de cuivre. La bobine compensatrice comporte 1400 spires; elle peut tourner autour d'un axe horizontal parallèle à son axe de symétrie; on règle son action en l'éclipsant plus ou moins par rapport aux inducteurs qui sont aussi circulaires. Le collecteur et les balais se trouvent à la partie supérieure et peuvent être visités sans ouvrir le couvercle principal. Le disque, en aluminium, est à la partie inférieure; il se déplace dans l'entrefer d'un seul aimant, dont l'action est réglable en le faisant tourner autour d'un axe vertical : ce réglage est progressif. Le poids de l'équipage mobile est d'environ 75 g; le couple normal, 7 g : cm. Consommation du fil fin, 1,5 watt pour 100 volts; consommation du gros fil pour le courant normal, 5 watts environ; chute de tension dans le gros fil pour le courant normal, de 1,7 pour le calibre 3 ampères à 0,05 pour le calibre 100 ampères.

» 4° *Compteur Landis et Gyr.* — Induit formé de trois bobines à 120°; collecteur formé de trois lamelles. Le disque, en aluminium, se déplace dans l'entrefer d'un aimant permanent dont l'action est réglable par déplacement. Ce déplacement se fait à l'aide d'une vis de rappel.

» La bobine de compensation peut tourner autour d'un axe excentrique. Poids de l'équipage mobile 110 g. Couple moteur normal 6 à 8 g : cm. Consommation du fil fin, 1,5 watt pour 100 volts. Nombre de tours par minute pour le courant normal, 78 à 80 t : m. Consommation du gros fil pour le courant normal, 10 à 12 watts pour les calibres au-dessus de 10 ampères. Ampères-tours dans l'induit, 40 environ. Ampères-tours des inducteurs en pleine charge, 1000 à 1200 environ. La tension aux bornes de l'induit est d'environ 8 volts, le courant qu'il absorbe, environ 15 milliampères. L'influence de la température est rendue faible par l'emploi de métaux appropriés pour la résistance en série avec l'induit.

IV. — COMPTEURS D'INDUCTION OU A CHAMPS TOURNANTS POUR CIRCUITS MONOPHASÉS.

» Les compteurs genre Thomson sont employés quelquefois pour les courants alternatifs. Ils ont l'avantage d'être relativement peu influencés par la fréquence et surtout par la forme de la courbe du courant alternatif.

» Pourtant on leur préfère, dans presque tous les cas, les compteurs d'induction, qui sont d'une construction simple, très robustes, d'un réglage facile, et demandent peu d'entretien, parce qu'ils ne comportent ni collecteur, ni balai. Leur encombrement est réduit et leur prix peu élevé. Ils ont seulement l'inconvénient d'être influencés par la fréquence et la forme des courbes du courant (¹), mais ces influences sont fortement atténuées dans les compteurs actuels.

» Les compteurs employés couramment, sont des compteurs à *disques*, c'est-à-dire dont l'équipage mobile se compose d'un disque,

(¹) Voir GRASSOT, *Compteurs d'électricité* (*Bulletin de l'Association suisse des Électriciens*, janvier 1912, p. 6), et DURAND, *op. cité*, p. 20.

en cuivre ou en aluminium, tournant autour de son axe, dans les entrefers d'un ou deux électro-aimants. Ces électro-aimants portent des bobines, les unes parcourues par le courant principal ⁽¹⁾, les autres, par un courant proportionnel à la différence de potentiel aux bornes du réseau et décalées en arrière, par rapport à celles-ci, d'un angle voisin de 90° ⁽²⁾.

» Un ou deux aimants permanents créent un couple freinant.

» On fait d'habitude la théorie de ces compteurs en supposant le disque remplacé par un cylindre et en assimilant le compteur à un moteur asynchrone à champ tournant (en réalité, on considère deux champs inégaux tournant en sens contraire). On néglige, d'autre part, la réaction magnétique de l'équipage mobile. Cette dernière hypothèse est loin d'être exacte et il est facile de s'en rendre compte. En effet, la vitesse du disque est très faible : pour un compteur fonctionnant à la fréquence 50, qui est la fréquence la plus usitée, la vitesse du disque pour le courant normal est de 60 t : m, soit 1 t : s, tandis que la vitesse de synchronisme serait de 50 t : s. On a donc affaire à un moteur asynchrone tournant dans le voisinage du démarrage (très grand glissement) et l'on sait que, dans ces conditions, la réaction du rotor n'est nullement négligeable devant sa résistance.

» D'ailleurs certains constructeurs se servent de la réaction du disque pour produire le réglage de la marche en circuit inductif ⁽³⁾.

» Je crois avoir le premier fait la théorie exacte de ces compteurs en raisonnant directement sur le disque et en tenant compte de la réaction magnétique (ou plutôt des réactions magnétiques) ⁽⁴⁾.

» Voici les résultats principaux de cette théorie :

» Les bobines parcourues par le courant principal I créent dans l'entrefer, dans lequel se déplace le disque, un champ proportionnel

⁽¹⁾ Ou un courant proportionnel au courant principal, lorsqu'on emploie des transformateurs d'intensité.

⁽²⁾ En général 80° à 85°.

⁽³⁾ Ex. Compteur Cosinus, voir p. 272.

⁽⁴⁾ Voir ILIOVICI, *Sur la théorie des compteurs d'induction à disque* (*La lumière électrique*, n° 6 et 7 des 11 et 18 février 1911) et aussi fascicule 22 de l'*Encyclopédie électrotechnique*, déjà cité, p. 77. Dans le travail publié dans *La Lumière électrique*, j'ai introduit la notion de *champs magnétiques tournants à lignes de force parallèles à l'axe de rotation*. J'attire l'attention sur cette notion, parce que beaucoup d'ingénieurs s'imaginent que les champs tournants sont forcément *radiaux*.

à ce courant; ce champ produit dans le disque des courants induits, qui donnent naissance à leur tour à un champ magnétique proportionnel à I .

» Soit $\mathfrak{K}$, la valeur maxima de la résultante de ces deux champs.

» De même le courant i qui parcourt les bobines montées aux bornes du réseau produisent un champ proportionnel à i , donc à U la différence de potentiel aux bornes du circuit. Sur ces bobines « volts » on monte habituellement des bagues en court circuit qui ajoutent leurs réactions à celle du disque. Ces réactions créent un champ proportionnel à i , qui s'ajoute au champ précédent pour créer un champ résultant proportionnel à U et dont nous appelons $\mathfrak{K}_2$ la valeur maxima.

» Soient, de plus, $\mathfrak{K}$ le champ de l'aimant permanent, ω la pulsation du courant alternatif, φ l'angle de décalage de I sur U , P la puissance consommée dans le circuit sur lequel est monté le compteur (circuit d'utilisation), ω' la vitesse de rotation du disque, on a

$$(5) \quad \frac{\omega'}{P} = K \left(1 - B_1 \frac{\mathfrak{K}_1^2}{\mathfrak{K}^2} - B_2 \frac{\mathfrak{K}_2^2}{\mathfrak{K}^2} \right) \left(1 - \frac{\rho^2}{\lambda^2 \omega^2} \right) \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{L_1^2}{R_1^2} + \frac{L_2^2}{R_2^2} \right) \omega^2 \right] \\ \times \{ 1 - [\cot \chi_2 - \tan(\theta'_2 - \theta'_1)] \tan \varphi \} + K_1 \frac{\mathfrak{K}_2^2 \omega}{\mathfrak{K}^2 P} - K_2 \frac{F}{\mathfrak{K}^2 P},$$

avec

$$\tan \chi_2 = \frac{\lambda \omega}{\rho}, \quad \tan \theta'_1 = \frac{L_1 \omega}{R_1}, \quad \tan \theta'_2 = \frac{L_2 \omega}{R_2}.$$

» Dans ces formules, K , B_1 , B_2 , K_1 , K_2 sont des constantes; F est le couple de frottement, ρ et $\lambda \omega$ sont la résistance et la réactance des bobines à fil fin (bobines « volts »), R_1 et $L_1 \omega$ les résistances et les réactances que le disque oppose aux actions du circuit parcouru par le courant I , R_2 et $L_2 \omega$ la résistance et la réaction de l'ensemble disque et bagues en court circuit, par rapport au circuit volts.

» Si l'on suppose $\mathfrak{K}_1$ et $\mathfrak{K}_2$ négligeables devant $\mathfrak{K}$, si l'on néglige les réactances L_1 et L_2 devant R_1 et R_2 , et si l'on suppose que les bobines à fil fin ont une résistance négligeable devant leur réactance, la formule (5) devient

$$(5') \quad \frac{\omega'}{P} = K + K_1 \frac{\mathfrak{K}_2^2 \omega}{\mathfrak{K}^2 P} - K_2 \frac{F}{\mathfrak{K}^2 P}.$$

» Le terme en K_2 provient des frottements et celui en K_1 de la compensation de ceux-ci. Si l'on suppose encore ces deux termes

négligeables, on arrive à la formule d'un compteur idéal

$$(5'') \quad \frac{\omega'}{P} = K,$$

K étant une constante indépendante de la fréquence, de la forme de la courbe des courants alternatifs, de la température, et du $\cos \varphi$ du réseau.

» L'existence de cette formule comme cas limite fait penser qu'on doit pouvoir pratiquement s'approcher de ce cas idéal et obtenir un compteur d'induction peu influencé, dans les limites de la pratique courante, par la fréquence, par la température, par la forme de la courbe de courant, tant que celle-ci ne s'écarte pas trop de la sinusoïde, et par le $\cos \varphi$ du circuit.

» Ceci a été réalisé dans les compteurs actuels.

» La formule (5) indique dans quel sens on doit agir sur les divers éléments de l'appareil pour s'approcher du compteur idéal.

» Les termes correctifs en K_1 et K_2 doivent être rendus aussi faibles que possible; ces termes sont bien de signe contraire, mais l'un dépend de la fréquence, tandis que l'autre, provenant des frottements, en est indépendant. Il en résulte que ces termes ne pourront être égaux que pour une fréquence déterminée. *Il faut donc réduire au minimum les frottements et n'introduire un couple compensateur que lorsqu'on ne peut pas faire autrement.*

» Supposons donc négligeables les termes correctifs et occupons-nous de la partie principale de la formule (5).

» *Circuit non inductif.* — Considérons d'abord le cas du circuit non inductif.

» La formule (5) devient

$$(6) \quad \frac{\omega'}{P} = K \left(1 - B_1 \frac{\mathcal{R}_1^2}{\mathcal{E}^2} - B_2 \frac{\mathcal{R}_2^2}{\mathcal{E}^2} \right) \left(1 - \frac{\rho^2}{L^2 \omega^2} \right) \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{L_1^2}{R_1^2} + \frac{L_2^2}{R_2^2} \right) \omega^2 \right].$$

» D'après la formule (6), pour que le compteur soit peu influencé par la fréquence, il faut :

» ρ négligeable devant $\lambda \omega$, $L_1 \omega$ négligeable devant R_1 et $L_2 \omega$ devant R_2 , c'est-à-dire :

» Pour qu'un compteur soit peu influencé par la fréquence, *il faut que la résistance du fil fin soit négligeable devant sa réactance* (c'est pourquoi ces bobines sont à circuit magnétique aussi fermé que possible) *et les réactances du disque et des bagues en court circuit doivent être aussi faibles que possible devant leurs résistances*. Il en résulte que l'entrefer doit être grand, que le disque en aluminium est préférable parce qu'il donne une plus grande résistance (1), que les bagues doivent intervenir le moins possible. Le couple actif est réduit par ces conditions.

» Le champ $\mathcal{H}_2$ doit aussi être faible devant $\mathcal{H}$, parce que $\mathcal{H}_2$ dépend de la fréquence, il en résulte que les compteurs fortement freinés seront plus facilement soustraits à l'influence de la fréquence.

» La température agit sur ρ , R_1 , R_2 et $\mathcal{H}_2$, il en résulte qu'un compteur peu influencé par la fréquence sera aussi peu influencé par la température [voir formule (6)].

» *Circuit inductif.* — Si nous considérons maintenant le cas général de la formule (5), on voit que pour que $\frac{\omega'}{P}$ soit constant pour une fréquence donnée il faut que le coefficient de $\tan \varphi$ soit nul. Pour cela il faut :

» 1° $\cot \chi_2 = 0$ et $\tan(\theta'_2 - \theta'_1) = 0$, ce qui donne

$$\chi_2 = \frac{\pi}{2} \quad \text{ou} \quad \rho = 0, \quad \text{et} \quad \frac{L_1}{R_1} = \frac{L_2}{R_2};$$

ou

» 2° $\cot \chi_2 = \tan(\theta'_2 - \theta'_1)$, ce qui donne

$$\frac{\rho}{\lambda \omega} = \left(\frac{L_1}{R_1} - \frac{L_2}{R_2} \right) \omega.$$

» Les conditions 1° sont satisfaites dans le compteur idéal.

» Dans un compteur réel on est forcé de se tenir à la condition 2°, qui dépend de la fréquence.

» Il en résulte *qu'un compteur ne pourra être réglé pour la*

(1) L'aluminium est aussi intéressant à cause de son faible poids spécifique.

marche exacte en circuit inductif que pour une fréquence donnée.

» D'autre part, le terme connectif

$$[\cot \gamma_1 - \tan(\gamma'_1 - \gamma''_1)] \tan \varphi$$

sera d'autant plus important que φ sera plus grand, donc *le fonctionnement d'un compteur sera d'autant plus influencé par la fréquence que le circuit sera plus inductif.*

» De ce qui précède il résulte aussi (voir 2°, p. 269) *qu'on devra rendre séparément $\frac{\rho}{L\omega}$ et $\left(\frac{L_1}{R_1} - \frac{L_2}{R_2}\right)\omega$ aussi faibles que possible (1), donc :*

» *Le courant i dans la bobine à fil fin devra être décalé, par rapport à la différence de potentiel U , d'un angle aussi voisin que possible de 90° (pratiquement cet angle varie de 80° à 85° environ) et l'influence de la réaction du disque et des bagues en court circuit, ou autres artifices servant à régler la marche des compteurs en circuit inductif, devra être réduite au minimum.*

» Dans la théorie indiquée on suppose que les champs $\mathcal{H}_1$ et $\mathcal{H}_2$ sont proportionnels aux courants qui les produisent, ce qui n'est pas exact pour les forts courants, lorsque le fer commence à se saturer : la saturation du fer a pour effet de faire retarder le compteur. Le même effet est produit par le freinage provenant des champs $\mathcal{H}_1$ et $\mathcal{H}_2$ (2) qui ne sont pas négligeables devant $\mathcal{H}$. Ceci produit aussi une certaine dépendance de la tension.

» Dans les bons compteurs on est arrivé à réduire l'influence de la tension à environ 1 pour 100 pour 10 volts de variation dans le voisinage de la tension normale de 110 volts; l'influence de la température est d'environ 1 pour 100 pour 25° C.; celle de la fréquence de moins de 1 pour 100 entre 40 et 90 ~ pour un compteur devant fonctionner à 50 ~, en circuit non inductif.

» Les compteurs des divers constructeurs diffèrent entre eux, outre les détails de construction, par le nombre et la disposition des

(1) Pour s'approcher le plus possible des conditions 1° d'un compteur idéal.

(2) Ceci résulte du terme $\left(1 - B_1 \frac{\mathcal{H}_1^2}{\mathcal{H}^2} + B_2 \frac{\mathcal{H}_2^2}{\mathcal{H}^2}\right)$ de la formule (5).

bobines, par les artifices de réglage de la marche exacte en circuits non inductifs et inductifs, etc.

» Nous allons décrire succinctement quelques modèles caractéristiques.

» 1° *La Compagnie des Compteurs* construit le compteur ACT III et deux modèles de compteurs CTA.

» Le compteur ACT III (*fig. 6*) comporte une bobine « volts »

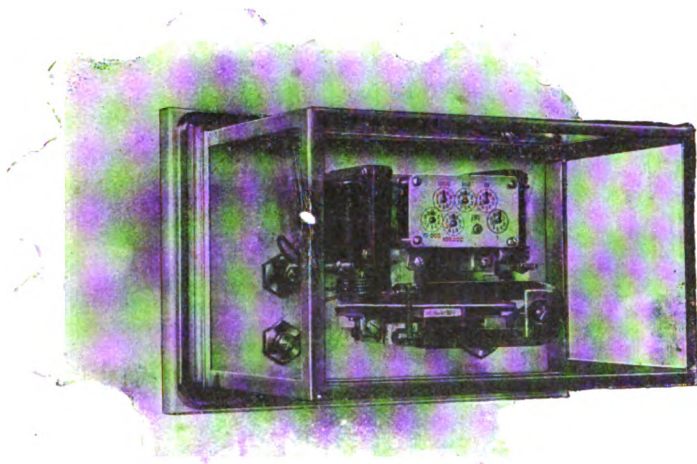


Fig. 6. — Compteur ACT, modèle de tableau.

et deux bobines « ampères ». Le réglage de la marche en circuit inductif se fait à l'aide d'une bague en cuivre fermée par une vis, formée de deux métaux, cuivre et constantan; suivant la position de la vis, le circuit est plus ou moins résistant. Le disque est en aluminium; l'amortissement est produit par un aimant permanent dont on règle l'action à l'aide d'un shunt magnétique formé d'une tôle en fer doux dans laquelle se visse deux vis du même métal.

» L'électro-aimant porte une armature dont le déplacement permet de compenser le couple de frottement en créant une petite dissymétrie.

» Les compteurs CTA diffèrent du précédent surtout par la position des bobines « ampères » qui sont éloignées du disque, par la forme de l'électro-aimant, par le shunt magnétique, qui pour l'un des types est le même que pour le compteur Thomson modèle C (*voir p. 263*)

et par le dispositif de réglage de la marche en circuit inductif. Ce réglage se fait par des bagues en court circuit simple, dont on superpose le nombre nécessaire, et il est fait une fois pour toutes.

» Quelques données numériques concernant le compteur ACT III : Couple normal, 3 à 4 g : cm. Poids de l'équipage, 25 g. Vitesse normale, inférieure à 50 t : m. Consommation du fil fin, 0,8 à 0,9 watt environ pour 110 volts ou 220 volts 50 ~ et 1,5 watt environ pour modèle 25 ~. Nombre d'ampères-tours gros fil, 60 à 80 a. t. environ pour les calibres courants. Consommations maxima du circuit gros fil, environ 1 watt pour calibre 10 ampères, 1,6 watt pour 30 ampères, 0,6 watt pour 2 ampères.

» Pour les compteurs de 50 à 150 ampères, couple maximum, environ 5 à 6 g : cm. Vitesse de rotation pour courant normal, environ 40 t : m.

» 2° *La Compagnie anonyme Continentale* construit le compteur Cosinus (fig. 7) dont le dernier modèle porte la marque CPDE. Il

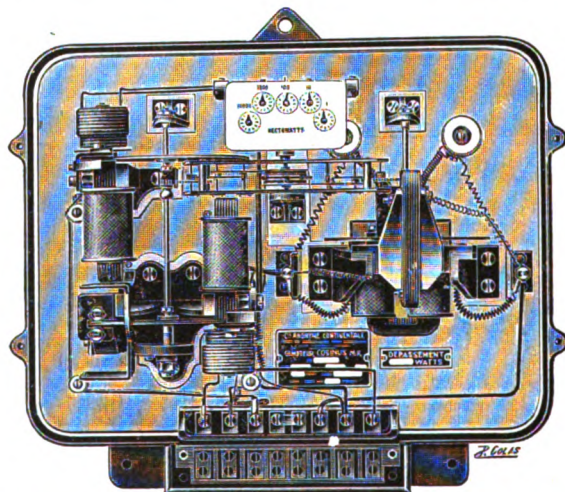


Fig. 7. — Compteur « Cosinus » triphasé avec dispositif à dépassement ⁽¹⁾.

diffère du modèle MR décrit dans le fascicule 22 de l'*Encyclopédie électrotechnique*, surtout par des détails de construction. Son disque est en aluminium, le couple maximum est d'environ 4,5 g : cm.

(¹) Le compteur « Cosinus » pour courant monophasé (voir fasc. 22 de l'*Encyclopédie électrotechnique*, fig. 60 et 61) ne comporte qu'un seul disque et un groupe d'électro-aimants semblable à celui vu à gauche et en haut de la figure 7 ci-dessus.

» Le réglage de la marche en circuit inductif se fait en agissant sur la réaction du disque sur le circuit « ampère ».

» Le réglage de l'amortissement se fait par shunt magnétique.

» 3° *La Compagnie de Construction électrique* construit le compteur BT dont le dernier modèle est le modèle I (*fig. 8*). Ce compteur comporte deux bobines « volts » et une bobine « ampère ».

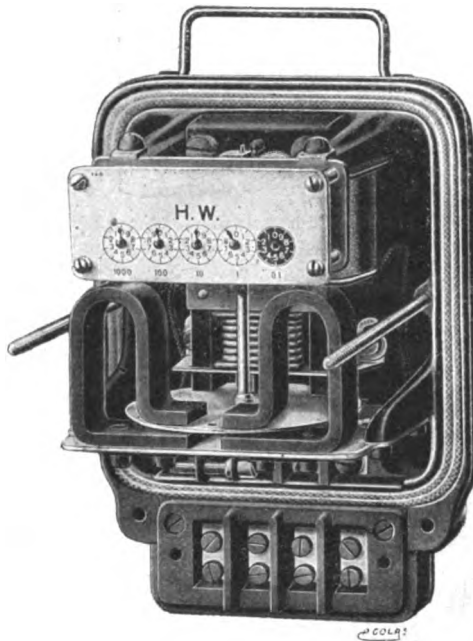


Fig. 8. — Compteur BT, modèle « I ».

» Le réglage de la marche en circuit inductif se fait à l'aide d'une double bague en cuivre dont l'action est réglable par déplacement en hauteur. Le disque est en cuivre. L'amortissement est obtenu à l'aide de deux aimants, dont les pôles en regard sont de signe contraire. On règle leur action par déplacement, qui peut se faire d'une façon continue.

» La compensation des frottements se fait par déplacement de l'armature de l'électro-aimant. Poids de l'équipage, 58 g environ. Couple normal, 8 à 14 g : cm. Nombre de t : m pour courant normal, 40. Consommation du fil fin, inférieur à 1 watt pour 110 volts.

» 4° *La maison Japy* construit un compteur type AR, de dimen-

sions très réduites, pour faibles courants (2 à 5 ampères, 110 volts) et un compteur type AJF pour calibres de 5 à 50 ampères.

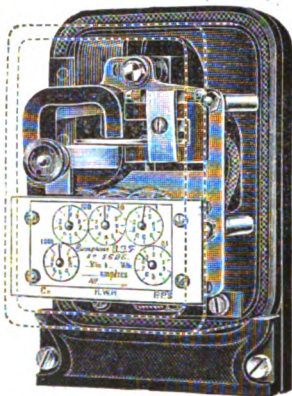


Fig. 9. — Compteur Japy, type AJF.

» Dans ces appareils, l'électro-aimant unique porte deux bobines « volts » et quatre bobines « ampères », enroulées comme l'indique la figure 9 bis. La marche exacte en circuit inductif s'obtient à l'aide

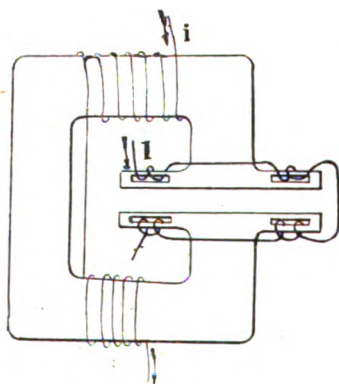


Fig. 9 bis. — Electro-aimant de compteur Japy.

de deux spires en court circuit, reliées entre elles d'une façon appropriée. L'action de l'aimant permanent est réglable par déplacement (translation) dans le type AR et par shunt magnétique dans le type AJF. La compensation des frottements s'obtient en créant une dissymétrie dans la position de l'électro-aimant.

» La figure 9 représente un compteur AJF ouvert.

» 5° Le compteur *Westinghouse type N* (fig. 10) comporte deux

électro-aimants de formes spéciales, placés d'un côté et de l'autre du disque en aluminium ; l'un porte une bobine à fil fin, l'autre deux bobines à gros fil. La marche en circuit inductif et la compensation des frottements s'obtiennent à l'aide de bagues en court circuit, dont les posi-

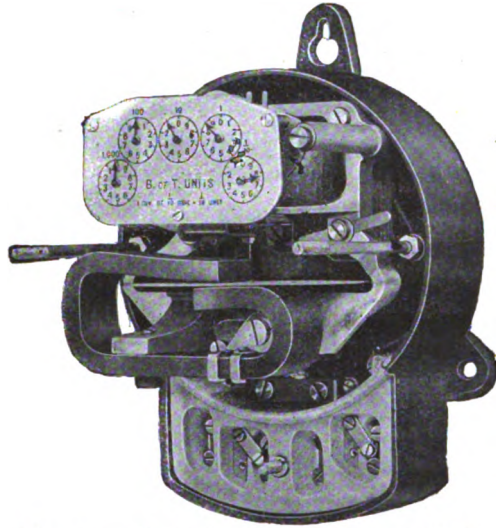


Fig. 10. — Compteur Westinghouse, modèle N.

tions sont réglables d'une façon graduelle. L'action de l'aimant permanent est réglable par rotation autour d'un axe vertical.

» Poids de l'équipage, 11,5 g environ. Couple normal, 4 g : cm. Nombre de t : m pour courant normal, 40. Consommation dans le fil fin pour 110 ou 220 volts, 50 ~, environ 2 watts. Consommation dans le gros fil pour courant normal, environ 0,5 watt.

V. — COMPTEURS D'INDUCTION POUR CIRCUITS POLYPHASÉS.

» On a proposé un grand nombre de dispositifs pour compteurs pour circuits triphasés, en tenant compte des propriétés particulières de ces circuits ⁽¹⁾. En général, ces compteurs n'ont pas donné de résultats satisfaisants, parce que les propriétés théoriques des circuits triphasés ne se retrouvent pas tout à fait dans la pratique. Les circuits à cou-

(1) Voir JANET, *Les Compteurs à l'Exposition de 1900* (Bulletin de la Société internationale des Électriciens, février 1901).

rants triphasés sont en général déséquilibrés et le déséquilibre des courants amène aussi celui des tensions, on n'a donc pas affaire pratiquement à des tensions triphasées.

» Les seules méthodes exactes sont celles dont les résultats ne dépendent ni des valeurs, ni des phases des différences de potentiels dits *triphasés*; ces méthodes sont : la méthode des 2 wattmètres pour les circuits triphasés à trois fils, la méthode des 3 wattmètres pour les circuits triphasés à quatre fils (avec fil d'équilibre).

» Le compteur triphasé actuel pour circuit à trois fils se compose de deux électro-aimants de compteur monophasé agissant sur un disque unique (Compagnie des Compteurs, Compagnie anonyme Continentale, Japy frères), ou sur deux disques montés sur le même arbre (Compagnie de Construction électrique, Compagnie anonyme Continentale, Westinghouse, Landis et Gyr).

» Les compteurs pour circuits triphasés à quatre fils se composent de trois électro-aimants de compteur monophasé agissant sur deux ou trois disques montés sur le même arbre.

» Voici, à titre d'exemples, quelques données numériques sur des compteurs triphasés pour trois fils (calibre 110 volts, 10 ampères, 50 ~) :

	Couple normal.	Poids de l'équipage.	Consomma- tion de fil fin.	Nombre de t : m. pour courant normal.	Consomma- tion de gros fil.	Nombre de disques.
	cm : g env.	g env.	env.	env.	env.	
ACT III.....	6	36	2×1	35	2×1	1
Westinghouse type N..	8	25	$2 \times 1,8$	40	$2 \times 0,5$	2
Landis et Gyr	10	70	$2 \times 0,7$	48	2×1	2

» On construit aussi des compteurs simplifiés pour circuits triphasés trois fils équilibrés, mais ces appareils ne doivent être employés que dans les cas où la précision demandée n'est pas très grande.

» Pour les circuits diphasés on emploie des compteurs composés des mêmes éléments, connectés d'une façon appropriée.

VI. — COMPTEURS SPÉCIAUX.

» Les compteurs spéciaux : double et triple tarif, compteurs à tarification variable, à paiement préalable, à indicateur de maximum, etc. sont relativement peu employés. Dans ces appareils, on emploie d'ailleurs un compteur des types décrits, combiné avec un dispositif approprié.

» Je dirai seulement quelques mots sur les compteurs à *dépassement*. Ces appareils n'indiquent que l'énergie consommée lorsque la puissance instantanée dépasse une certaine limite, fixée d'avance.

» Les compteurs à dépassement appartiennent à deux types différents :

» 1° Les compteurs à équipage unique, dans lesquels on ajoute, aux couples du compteur normal, un *couple antagoniste constant*, réglable. A ce type appartient le compteur construit par la *Compagnie des Compteurs* et la *Compagnie de Construction électrique*. Le couple supplémentaire est donné par l'action d'un aimant permanent sur un cylindre en nickel, dont l'hystérésis fournit le couple cherché. Le réglage se fait très simplement par le déplacement de l'aimant en hauteur.

» Appareils très simples et très intéressants.

» 2° Les compteurs dans lesquels un système différentiel permet d'enregistrer la différence entre le mouvement d'un compteur normal et celui d'un équipage à vitesse constante. Un cliquet empêche la minuterie de *décompter*. A ce type appartient le compteur de la Compagnie anonyme Continentale, le compteur Landis et Gyr, etc.

» Dans le premier (*fig. 7*) le mobile à vitesse constante est analogue à l'équipage d'un compteur d'induction, mais les bobines qui agissent dessus ne sont parcourues que par des courants égaux ou proportionnels au courant principal, et il n'existe pas d'aimant permanent.

» Le couple actif est alors de la forme kI^2 et le couple amortisseur de la forme $k'\omega'I^2$, ω' étant la vitesse de rotation. On a donc

$$kI^2 = k'\omega'I^2,$$

d'où

$$\omega' = \frac{k}{k'} = \text{const.}$$

» Dans le compteur Landis et Gyr le mouvement du mobile à vitesse constante est obtenu à l'aide d'un mécanisme d'horlogerie.

VII. — COMPTEURS A PUISSANCE COMPLEXE. COMPTEUR AMPÈREHEUREMÈTRE
A COURANTS ALTERNATIFS.

» On s'est souvent posé la question de savoir si c'est bien *l'énergie électrique*, qu'il convient de faire payer à un abonné. Ce qui paraît être juste, c'est de lui faire payer une *redevance proportionnelle aux frais qu'il occasionne au fournisseur d'électricité*. Or ces frais ne dépendent pas seulement de *l'énergie* consommée, mais de la forme de cette énergie, de l'heure à laquelle elle a été consommée et de la régularité avec laquelle on l'utilise. Ainsi, par exemple, l'énergie *non inductive* revient, toutes autres conditions restant les mêmes, à un prix moindre que l'énergie *fortement inductive*, d'où l'idée d'un compteur mesurant non l'énergie réelle, mais une quantité complexe, qui tient compte de la *puissance réelle* et de la *puissance magnétisante*. Un tel appareil a été proposé par Riccardo Arno. Son compteur mesure la puissance réelle et une fraction appropriée de la *puissance apparente*. Cette solution ne me paraît pas la meilleure; il serait plus exact de compter la *puissance réelle* et une fraction appropriée de la *puissance magnétisante*, et un tel compteur serait plus facile à réaliser que celui de Ricardo Arno et plus facile à régler et à étalonner. Je n'insiste pas sur cette question (1), qui nous mènerait trop loin.

» Mais il y a une autre question intéressante concernant les petits abonnés des Usines hydrauliques qui distribuent toujours du courant alternatif. Pour faciliter l'introduction de l'électricité chez les petits consommateurs, ces usines font des forfaits consistant à faire payer une somme annuelle déterminée pour une puissance maxima à consommer, sans s'occuper de la durée. Pour que l'abonné n'installe pas de lampes plus fortes que celles prévues, on a imaginé plusieurs moyens de contrôle dont le plus répandu est le *limiteur de courant*.

(1) Voir, à ce sujet, RICCARDO ARNO, *Di una soluzione del problema della compra-vendita dell'energia elettrica* (Congresso internazionale delle applicazioni elettriche, Torino, 10-17 settembre 1911). — E. GHILARDI, *Influence du facteur de puissance sur le prix de revient de l'énergie électrique dans les distributions à courant alternatif* (Revue électrique, t. XXIII, n° 270, p. 258). — G. DARRIEUS, *Ibid.* (Revue électrique, t. XXII, n° 254, p. 62).

» Mais le limiteur est trop brutal et il limite la consommation, ce qui est contraire aux intérêts des fournisseurs.

» On a donc cherché autre chose. La Compagnie des Compteurs construit dans ce but un petit compteur à dépassement, très simple, d'un prix à peine supérieur à celui d'un bon limiteur de courant. Cet appareil, dénommé *Indicateur d'excédent de consommation pour courant alternatif*, est un petit ampèreheuremètre à dépassement, dont le principe est très intéressant.

» Il se compose d'un équipement mobile, comportant un disque dont la partie centrale est en *nickel* et la couronne extérieure en *cuivre*. Ce disque se déplace dans l'entrefer d'un *aimant* permanent et d'un électro-aimant, de forme spéciale, portant une bobine parcourue par le courant principal. L'électro-aimant présente deux dents en face du disque, sur lesquelles est montée une double bague, dont une partie est réglable à l'aide d'une vis en cuivre constantan. Le mouvement de l'équipage est transmis à un mouvement d'horlogerie (*fig. 11*).

» La théorie de cet appareil est la suivante :

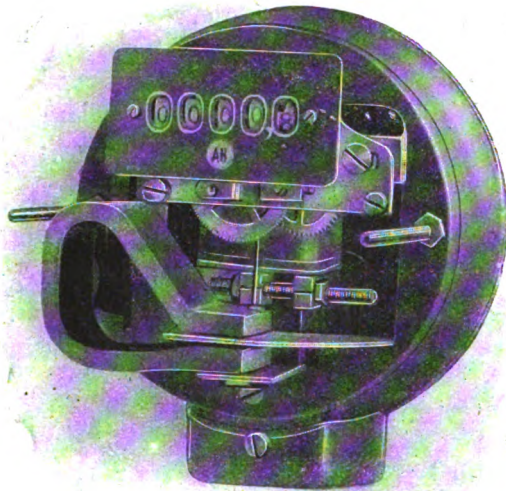


Fig. 11. — Compteur ampèreheuremètre à courant alternatif.

» L'électro-aimant crée un couple actif, proportionnel au carré du courant

(7)

$$k I^2$$

(ce couple est réglable à l'aide de la bague à résistance variable) et un couple freinant, proportionnel à la vitesse ω' et à I^2

$$(8) \quad k' \omega' I^2;$$

l'aimant permanent crée un couple proportionnel à ω'

$$(9) \quad k'' \omega',$$

et l'hystérésis dans le nickel soumis à l'influence du même aimant donne un couple constant c . Lorsque la vitesse du disque est uniforme, on a

$$k I^2 = k' \omega' I^2 + k'' \omega' + c,$$

d'où l'on tire

$$(10) \quad \omega' = \frac{k I^2 - c}{k' I^2 + k''}.$$

» La fonction ω' de I s'annule pour $I_0 = \sqrt{\frac{c}{k}}$ et présente un point d'inflexion pour $I_1 = \sqrt{\frac{k''}{3k'}}$.

» Or, on sait que, dans le voisinage d'un point d'inflexion, toute courbe se confond avec une ligne droite, pratiquement sur une assez grande longueur.

» Si l'on choisit donc les constantes de l'appareil de façon que $I_1 > I_0$ et suffisamment voisin, ω' sera proportionnel à $I - I_0$ sur un assez grand intervalle, et l'on aura, dans cet intervalle, un *ampère-heuremètre à dépassement*, le point de dépassement étant I_0 .

» Voici quelques données sur un ampèreheuremètre de 2 ampères, 50 $\sim$. Disque en cuivre et nickel, diamètre 60 mm, épaisseur 1 mm. Couple normal 5 à 6 g : cm. Ampères-tours maxima, 4 à 500 environ. Résistance du fil, 0,6 ohm environ.

» Résultats d'essais : Point de dépassement, 0,96 ampère. Pour 1,1 ampère, retard de 2 pour 100; pour 1,4 ampère, avance de 2 pour 100; pour 2 ampères, avance de 1 pour 100; pour 3 ampères, retard de 1,5 pour 100.

» On voit que les résultats sont bien satisfaisants.

» Messieurs, j'ai terminé les quelques indications que je voulais vous donner sur les compteurs actuels d'électricité. Ce que je viens

de dire est bien insuffisant pour vous faire bien saisir les transformations qu'ont subies les compteurs depuis quelques années, parce que le plus souvent il s'agit de perfectionnement de détail plus que de principe. Ce que je puis affirmer, c'est que nos constructeurs perfectionnent constamment les appareils ainsi que les méthodes de travail, et que les compteurs français sont au moins aussi bons que les meilleurs appareils étrangers. En ce qui concerne les prix, je suis convaincu qu'ils pourront toujours concurrencer les appareils étrangers et, dans la libre concurrence, nos constructeurs pourront toujours lutter à armes égales avec ceux des autres peuples, excepté peut-être un seul. Mais si les Allemands arrivent à pouvoir faire des prix inférieurs aux autres, cela ne tient pas seulement à leurs méthodes de travail; les encouragements officiels y sont pour beaucoup, et ce qui se passe aujourd'hui paraît prouver suffisamment que ces encouragements n'avaient pas seulement pour but le développement de l'industrie allemande, mais aussi, et peut-être surtout, de créer un outillage perfectionné qui devait servir à d'autres fins que les buts industriels. Que ce qui arrive nous serve de leçon! A l'avenir, lorsqu'un représentant allemand se présentera pour nous faire un prix inférieur aux autres concurrents, n'oublions pas que les quelques sous ou les quelques francs que nous économisons ainsi risquent de nous coûter fort cher, non seulement en argent, mais en vies françaises..., et que l'argent que nous fournissons aux Allemands servira peut-être à forger des armes contre nous ou contre nos enfants.

» Avant de terminer, permettez-moi de remercier les constructeurs, qui ont mis tant d'amabilité à me donner des renseignements sur leurs appareils, et en particulier la Compagnie pour la Fabrication des compteurs, la Compagnie anonyme Continentale, la Compagnie de Construction électrique, MM. Japy frères, la Société Westinghouse et la Compagnie Landis et Gyr.

» Je vous remercie aussi, Messieurs, de la bienveillante attention que vous avez bien voulu m'accorder. »

A la demande de M. Magunna, M. Iliovici ajoute des indications sur la valeur de la pression exercée par les balais sur le collecteur et les moyens employés pour maintenir cette pression constante.

M. le PRÉSIDENT. — « Je remercie M. Iliovici de l'intéressante Communication qu'il vient de nous présenter. Peut-être serais-je porté à trouver un peu excessive l'exclusion des compteurs à balanciers. Tout en reconnaissant la pleine valeur des critiques apportées par M. Iliovici en ce qui concerne ces appareils, j'ai constaté que les dérangements sont rares sur ces compteurs lorsqu'ils sont construits avec soin, et qu'ils présentent l'avantage d'apparaître avec netteté quand ils se produisent; d'autre part, leur faible sensibilité à certaines causes d'erreur, qui nous a été rappelée par M. Iliovici, les rend intéressants pour la mesure des grosses quantités d'énergie, pour lesquelles des erreurs relativement petites des compteurs peuvent entraîner des pertes importantes. Je me hâte d'ajouter que cette remarque ne constitue en rien une critique de l'intéressante Communication de M. Iliovici, qui constitue une mise au point des plus utiles de l'importante question des compteurs électriques. »

La séance est levée à 19 h 5 m.

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES.

Forces électromotrices alternatives en parallèle,

par M. A. E. CLAYTON (*Inst. Elect. Eng.*, juin 1914).

L'auteur développe des formules symboliques assez simples, ayant trait aux circuits séries-parallèles contenant des forces électromotrices alternatives, et les applique au cas des alternateurs en parallèle; il rappelle une méthode, naguère traitée par lui, pour la détermination du coefficient de réactance d'un alternateur, méthode d'une grande utilité.

Convertisseurs de fréquence statiques,

par M. A. M. TAYLOR (*Inst. Elect. Eng.*, juin 1914).

Il s'agit d'une méthode imaginée par l'auteur pour convertir, par exemple, une distribution triphasée en distribution monophasée de fréquence triple. A cet effet, trois bobines primaires disposées sur un circuit magnétique unique, en série avec des bobines de réactance distinctes, sont branchées sur les canalisations principales; les noyaux des bobines de réactance sont fortement saturés. Des détails et des dimensions sont fournis quant à un groupe de 7 kW, lequel comporte un réglage de 8 pour 100. On estime de 86 à 88 pour 100 le rendement d'un groupe de 28 kW, et à 95 pour 100 le rendement d'un groupe de 500 kW. Le facteur de puissance du circuit primaire est très faible : 0,20, ce qui nécessite l'adjonction d'avanceurs de phase.

Isolateurs de 55 000 volts,

par M. T. CRAWFORD (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, août 1914).

L'auteur fait part de son expérience acquise sur un certain nombre de lignes à haute tension, situées dans les états occidentaux de l'Amérique du Nord, et montre que la qualité des isolateurs en porcelaine a beaucoup gagné par rapport à ce qu'elle était autrefois. Ces appareils sont maintenant éprouvés à 120 000 volts pendant 5 minutes, et ceux de l'espèce la plus récente n'éclatent que très rarement. Il est décrit un procédé permettant de reconnaître d'emblée une fuite d'isolateur. On emploie à cet effet une paire de récepteurs de télégraphie sans fil de 2000 ohms, de construction spéciale. Ces récepteurs sont branchés entre une fiche plantée dans le poteau et une pointe très effilée enfoncée de plusieurs pieds dans le sol. Si les isolateurs sont sains, on entend un bourdonnement clair, de même son que celui produit sur une ligne téléphonique; mais si l'un des isolateurs présente une fuite, ce bourdonnement est accompagné d'un bruit (grattage) caractéristique. L'isolateur en cause est alors reconnu au moyen d'un nouvel essai effectué au sommet du poteau, entre chaque isolateur et la traverse. Grâce à l'application périodique de ce procédé, et au remplacement de tout isolateur douteux, les dérangements ont été pratiquement supprimés.

Construction d'une station de télégraphie sans fil,

par C. G. ROACH (*Inst. Elect. Eng.*, juin 1914).

Ce Mémoire comporte quelques renseignements relatifs aux dispositions des mâts et des antennes, ainsi qu'à l'installation électrique des stations de Land End et de Fishguard.

Effet des connexions Δ et Y sur les formes d'onde des transformateurs,

par L. F. CURTIS (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, août 1914).

Là est réunie une collection très complète d'oscillogrammes montrant les courants d'excitation, les potentiels, etc., et tirés d'un groupe de trois transformateurs monophasés alimentés par un générateur triphasé, la capacité de celui-ci étant faible relativement à la capacité totale du groupe. Diverses combinaisons de couplages du générateur et des transformateurs furent essayées. L'auteur conclut que, au point de vue de la forme de l'onde, les groupes de transformateurs connectés en ΔY , en $Y\Delta$, ou en YY avec neutre du générateur relié, sont ceux qui donnent les meilleurs résultats. Avec des groupes dissemblables en parallèle, le dernier mode de couplage serait de règle.

Méthodes suggérées pour l'amélioration du service téléphonique,

par W. AITKEN (*Inst. Elect. Eng. Journ.*, mars 1914).

L'auteur s'efforce de suggérer certaines améliorations susceptibles d'être introduites en un laps de temps relativement court, et moyennant un faible surcroît de dépense, dans les tableaux-commutateurs appartenant à un modèle récent. Il y a lieu, pour les détails, de se référer au texte original.

Signaux acoustiques sous-marins,

par R. F. BLAKE (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, octobre 1914).

Le Mémoire examine tout au long les diverses méthodes de signaux employées pour la protection en mer, et montre ce qu'a de douteux la valeur des signaux acoustiques transmis à travers l'air. En effet, de semblables signaux sont tellement variables en portée, comme en intensité, qu'ils risquent d'induire en erreur. Considérant par exemple le son d'une sirène : il peut être entraîné par le vent, ou encore réfléchi ou réfracté par des couches d'air de différente densité, de sorte qu'interviennent des zones de silence susceptibles de reporter le point signalé de quelques centaines de mètres à 4 ou 5 milles en deçà ou au delà. D'où le discrédit de ce genre de signaux. Un grand progrès fut réalisé lorsque Mundy suggéra l'emploi de l'eau comme milieu de transmission, au lieu de l'air. L'eau a sur l'air les avantages suivants : 1° elle est exempte de dangereuses zones de silence; 2° l'absorption du son y est beaucoup moindre, le signal est alors absolument digne de foi et il se transmet à une distance beaucoup plus grande que dans l'air; 3° le son est soustrait à l'influence du vent; 4° il n'est pas affecté par les perturbations atmosphériques, comme c'est le cas avec les signaux de T. S. F.; 5° la détermination exacte de la direction de l'origine du son est rendue possible.

La méthode primitive de signalisation sous-marine consiste dans l'emploi d'une cloche, les signaux étant reçus par un microphone fixé au franc-bord du navire. La cloche sous-marine est actionnée par l'air comprimé. La roue motrice est pourvue, sur sa circonférence, de saillies telles que la rotation de la roue détermine une succession de coups, par séries espacées d'intervalles particuliers aux différentes stations de signaux. Le microphone est suspendu dans une cuve à eau, afin de supprimer les bruits dus aux machines, au clapotis, etc., qui risqueraient d'étouffer le son de la cloche. Un pareil microphone est installé de chaque côté du navire, à l'intérieur et à l'avant. Au moyen d'un commutateur, on peut relier soit l'un, soit l'autre des microphones, pour l'observation téléphonique des signaux.

On s'est efforcé d'étendre la portée de cet appareil à 25 ou 30 milles par exemple. A quoi s'oppose un sérieux obstacle, du fait de la presque absolue incompressibilité de l'eau, de l'énergie considérable nécessitée pour la compression, et de la vitesse non moins considérable à laquelle doivent s'effectuer les compressions ondulatoires successives, vitesse qui, pour la production d'une note musicale de 500 vibrations par seconde, correspond à un millième de seconde. S'il s'agit de transmettre des signaux Morse, l'appareil doit, pour diverses raisons, être capable de produire au moins 100 ondes de compression par seconde pour une vitesse de 20 mots par minute. Et si l'appareil est destiné à la transmission téléphonique, son action, beaucoup plus rapide encore, doit comporter plusieurs milliers d'ondes de compression par seconde.

Le dispositif imaginé par R. A. Fessenden, et décrit dans le Mémoire, consiste en un grand et très puissant électro-aimant annulaire à l'intérieur duquel se meut librement un tube de cuivre rattaché à un diaphragme en acier. Dans le tube de cuivre est une âme ou armature massive, en fer, sur laquelle s'enroule une bobine. Un courant alternatif est envoyé à travers cette bobine au moyen d'un manipulateur télégraphique, et des courants sont alors induits dans le tube de cuivre. La réaction de ceux-ci sur le champ permanent de l'électro-aimant annulaire permet au système mobile d'agir sur l'eau avec la force et la rapidité nécessaires. Une somme d'énergie de l'ordre de plusieurs kilowatts peut être appliquée à l'oscillateur. Avec l'appareil ci-dessus décrit, des signaux télégraphiques ont été transmis à une distance de 31 milles. Cet appareil fut installé, notamment, à bord de bateaux sous-marins. Le même dispositif est employé à la fois comme transmetteur et comme récepteur. La transmission téléphonique a été réalisée grâce à l'oscillateur en question, et à l'aide d'un transmetteur ordinaire et de six éléments à liquide immobilisé; ainsi on a pu transmettre des phrases à environ 800 m, et tenir une conversation à environ 400 m. Il semble qu'avec plus de puissance en jeu, de plus grandes distances pourraient se franchir. L'appareil a servi, en particulier, pour effectuer des sondages par la mesure du temps écoulé entre l'émission et la réflexion d'un son. L'application de l'oscillateur, aux usages maritimes en général, est d'importance.

Maladies de transformateurs,

par J.-L. THOMPSON (*Inst. Elect. Eng.*, juin 1914).

Ce Mémoire traite succinctement des principaux troubles qui peuvent affecter les transformateurs, savoir : absorption d'humidité; excès d'échauffement; courts circuits; régimes de tension anormaux.

Effet de l'électrolyse sur la force compressive du ciment et du béton,
par C.-E. MAGNUSSON et B. IZHUROFF (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, octobre 1914).

Ce Mémoire relate les résultats d'une série d'observations faisant suite à une série analogue effectuée en 1911, avec cette différence principale que les présents essais portèrent sur de plus longues périodes. Dans le nouveau Mémoire, les auteurs décrivent leurs méthodes et résultats d'expériences : d'une part, sur des blocs cubiques de béton soumis à une certaine tension électrique, soit dans l'eau douce, soit dans l'eau salée à 3 pour 100 de NaCl ; d'autre part, sur des blocs semblables immergés dans les mêmes conditions, mais non soumis aux effets de l'électrolyse. Il fut constaté que le courant ne modifiait pas la force compressive des cubes de ciment, du moins dans les limites de densité de courant où se tinrent les expériences. Celles-ci comportèrent, en eau douce, des densités moyennes de 0,19 et 0,28 milliampère par centimètre carré, respectivement appliquées pendant 310 et 225 jours ; et, en eau salée, des densités moyennes de 1,55 et 2,17 milliampères par centimètre carré, respectivement appliquées pendant 113 et 110 jours.

Certaines détériorations dues à l'électrolyse se produisent dans le ciment armé ; elles ont pour cause une augmentation de volume, provenant de ce que le fer de l'armature se transforme en oxyde de fer ; mais l'action directe du courant n'y est pour rien.

Données relatives aux systèmes de distribution à haute tension,
par un Comité d'ingénieurs (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, octobre 1914).

Le présent Rapport émane du sous-comité désigné par *the American Institute of Electrical Engineers*, pour une enquête auprès de 105 grandes compagnies de distribution d'énergie, fonctionnant à 25000 volts et au-dessus. Ce rapport, établi d'après les réponses parvenues au Comité, contient les données relatives au mode de fonctionnement et aux procédés d'exploitation de 25 desdites compagnies. Les résultats de l'enquête sont présentés, d'une part, sous forme de tableaux dressés avec soin et renfermant une grande quantité de renseignements caractéristiques ; d'autre part, sous la forme même de communications originales, de dessins, etc., dans les détails desquels il n'est pas possible d'entrer ici. En ce qui concerne les caractéristiques d'exploitation des diverses compagnies, on les trouve fort bien résumées en cinq tableaux principaux, comprenant de nombreuses colonnes. A la fin du rapport se trouve la liste des questions — dont le nombre dépasse 150 — qui furent adressées aux compagnies. Dans le rapport même, sont reproduites les communications originales traitant des points ne figurant pas dans les tableaux, et tels que : données et particularités relatives aux longues portées, tourelles de types spéciaux, détériorations des lignes, calcul des facteurs de sécurité, remèdes aux courts circuits, relais automatiques de surcharge, marche avec un côté à la terre, défauts dans les interrupteurs à huile, vibrations mécaniques des lignes, dispositifs spéciaux de protection, utilisation des lignes téléphoniques, modes de préservation du bois et leur efficacité, le tout accompagné de commentaire d'ordre général. En appendice, figurent un grand nombre de documents graphiques fournis par les diverses firmes, et qui, inspirés de la meilleure technique moderne, abondent en détails de toutes sortes relatifs à l'art de la distribution à haute tension. C'est ainsi que l'on voit des dessins de tourelle

d'acier, de construction de poteaux, d'isolateurs divers, de longues portées et flèches, de fondations de tourelles, d'entrées et de sorties de ligne à haute tension, des diagrammes d'installation, etc. Figurent également des reproductions photographiques montrant l'aspect général des poteaux, des tourelles, des dispositifs isolants, etc., dans certains cas typiques de distribution. A mentionner encore un tableau très détaillé des dépenses de construction des lignes de *the Yadkin River Power Co*, lignes à circuit double d'une longueur totale de 154 km, et transportant du courant à 100000 volts. Quant aux cinq tableaux mentionnés ci-dessus, ils renferment une multitude de renseignements et de chiffres relatifs aux lignes choisies par le Comité et constituent ainsi un véritable répertoire des méthodes actuellement pratiquées en Amérique, travail auquel il peut être utile de se référer.

Connexions Δ et Y dans le transport et la distribution d'énergie pour chemins de fer,
par C.-M. DAVIS (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, octobre 1914).

Ce Mémoire a pour objet d'examiner si le système de connexion Δ est préférable au système Y, et dans quelles conditions. Considéré au point de vue de la traction des chemins de fer, le problème, d'après l'auteur, se ramène aux trois cas ci-après : 1° l'exploitant achète l'énergie ; 2° il assume la production et le transport de l'énergie ; 3° il achète l'énergie et, en outre, il assume un système de distribution secondaire. En général, on peut dire que les considérations relatives au mode de connexion Δ ou Y sont les mêmes, qu'il s'agisse de chemins de fer ou d'autres exploitations. Les secondaires des transformateurs de sous-stations sont le plus souvent reliés en Δ , sauf pour les convertisseurs hexaphasés synchrones, et sauf encore le cas où les conditions locales nécessitent un neutre. Les convertisseurs hexaphasés synchrones sont d'ordinaire alimentés par des transformateurs reliés en triangle-diamétral, mais la connexion en étoile-diamétrale est également applicable. Pour les systèmes de distribution à basse tension entre sous-stations, l'économie commerciale est de beaucoup le facteur décisif.

IL Y A TRENTE ANS.

Juillet 1885. — Régulation automatique du courant des machines, par M. A. DE MERITENS.
— Applications de l'électricité aux armes à feu, par M. G. TROUVÉ. — Pile automatique, par M. E. BAZIN. — Sur l'induction téléphonique, par M. ELSASSER.

LISTE DES OUVRAGES

OFFERTS A LA SOCIÉTÉ INTERNATIONALE DES ÉLECTRICIENS.

(Suite.)

La Bibliothèque est ouverte aux Membres de la Société, tous les jours,
de 15 heures à 18 heures, excepté les dimanches et jours de fêtes,
12, rue de Staël.

France.

Calcul des lignes aériennes au point de vue mécanique par des abaques,
par André BLONDEL. Paris, Éditions de La Lumière électrique, 1915; 1 vol.
in-4°, broché. (Don de l'éditeur.)

Construction (La) électrique assurée par l'industrie française, par
M. HILLAIRET. (Extrait du *Bulletin de la Société d'encouragement pour
l'Industrie nationale*, numéro de mars-avril 1915.) Paris, typographie
Philippe Renouard, 1915; 1 brochure in-4°. (Don de l'auteur.)

*De l'identification des individus par les rayons X au moyen des os et des
dents*, par M. FOVEAU DE COURMELLES. Vannes, imprimerie Lafolye frères,
1915; 1 brochure in-8. (Don de l'auteur.)

*Nouvelle méthode pour rechercher, localiser et aider à extraire chirurgi-
calement les projectiles magnétiques*, par M. J. BERGONIE. (Extrait du *Bulle-
tin de l'Académie de Médecine*.) Paris, Masson et C^{ie}, 1915.

Étranger.

Université de Genève. Laboratoire de Physique :

3^e série, 11^e fascicule : *Stabilisation de l'arc électrique entre métaux*, par
Ch.-E. GUYE.

3^e série, 12^e fascicule : *Considérations thermodynamiques sur les équilibres
photochimiques*, par A. SCHIDLOF.

4^e série, 1^{er} fascicule : *Procédé simple de purification du mercure*, par
C. MARGOT.

4^e série, 2^e fascicule : *La cinétique des réactions photochimiques et la loi du
rayonnement*, par A. SCHIDLOF. Genève, Société générale d'Imprimerie,
1914; 4 fascicules in-8, brochés. (Don de M. Ch.-E. Guye.)

RENOUVELLEMENT DES ANNONCES.

En raison des circonstances, le renouvellement des annonces n'ayant pu être provoqué
en temps utile, le Bureau a cru bon d'en continuer la publication avec la confiance que
les intéressés en voudront bien acquitter le paiement.

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ INTERNATIONALE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

MEMOIRE : Les installations électromécaniques des mines de fer d'Ingouletz (Russie méridionale)
(M. H. Besson), p. 289.

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES, p. 316.

ERRATUM, p. 316.

IL Y A 30 ANS, p. 316.

LES INSTALLATIONS ÉLECTROMÉCANIQUES DES MINES DE FER D'INGOULETZ (RUSSIE MÉRIDIONALE);

Par M. HENRI BESSON.

Le bassin minier de Krivoï-Rog, situé dans les gouvernements de Kherson et d'Ekaterinoslaw, renferme d'importantes mines de fer dont les principales appartiennent aux Sociétés Dniépropowienne, Doubowaia-Balka, Briansk, Krivoï-Rog, etc. La situation de ce bassin, qui s'étend de Piatikatki à Nikolo-Kosselsk, est figurée sur la carte sommaire (*fig. 1*).

Vers l'extrémité sud du bassin se trouvent les mines d'Ingouletz appartenant à la Régie des mines de fer de la Société des Forges et Aciéries du Donetz, dont les récentes installations électromécaniques font l'objet de la présente Notice.

La figure 2 représente le tracé des lignes électriques actuelles réunissant la Centrale d'Ingouletz avec les groupes d'appareils récepteurs.

Dans la station centrale sont installés actuellement deux groupes électrogènes à vapeur de chacun 200 kW de puissance normale, produisant des

(¹) La Société n'est pas solidaire des questions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

courants triphasés sous la tension de 220 volts entre fils. L'installation est prévue pour permettre l'adjonction d'un troisième groupe, dont la puissance, à déterminer ultérieurement, sera probablement de 400 à 500 kW.

La tension a été choisie aussi basse parce que les principales machines réceptrices, pompes et treuils de puits, pompes de surface pour services divers, moteurs d'ateliers, etc., sont à proximité de la Centrale. Pour le

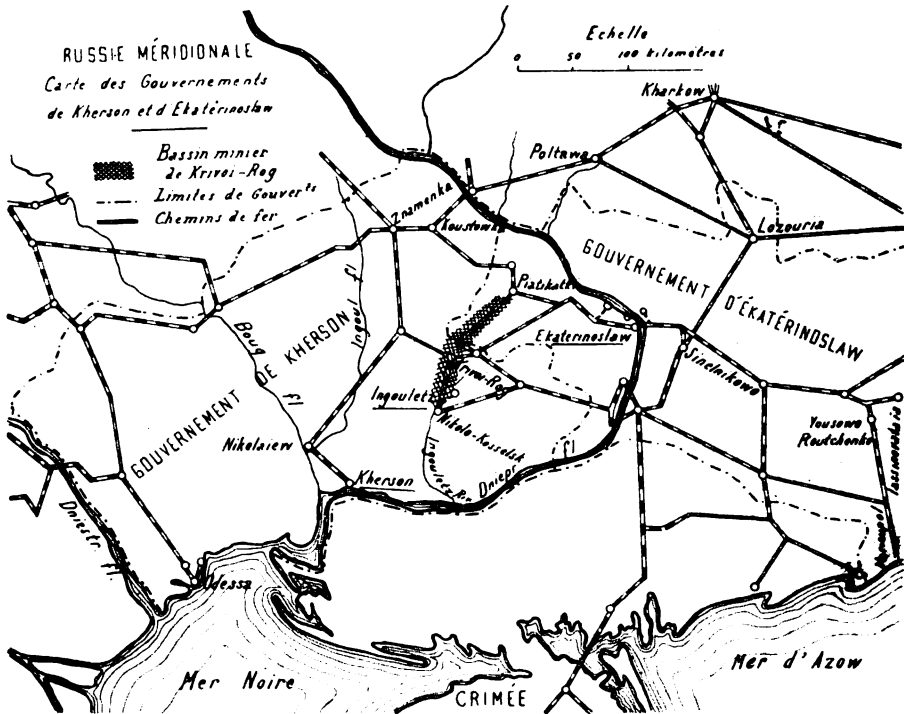


Fig. 1.

transport à distance, la tension choisie est de 5500 volts, le point extrême à desservir dans l'avenir se trouvant à une distance d'environ 5400 m.

A cet effet, la Centrale possède deux transformateurs élévateurs, de chacun 180 kWA qui desservent la ligne à haute tension. Cette ligne, visible sur la figure 2, est actuellement arrêtée au puits Vizirka, à une distance de 1650 m de la Centrale, où se trouve un transformateur abaisseur du même modèle que les précédents, dont les circuits secondaires fournissent, aux réceptrices du puits, du courant à 200 volts entre fils.

Un deuxième transformateur semblable sera installé ultérieurement à un puits plus éloigné, lorsque la ligne à haute tension aura atteint sa longueur totale.

Direction de la Régie des mines a cherché à concilier l'économie de consommation avec la simplicité de conduite et d'entretien.

Tout a été tenté pour donner à l'installation son maximum de sécurité : ainsi, non seulement les chaudières sont au nombre de deux, dont une seule suffit à alimenter le service restreint actuel, mais encore on a prévu une troisième chaudière pour les besoins futurs, et l'on a réuni les nouvelles chaudières de la Centrale avec les anciennes desservant le puits central, de façon qu'en cas d'insuffisance, nettoyage ou avarie, la Centrale ne manque jamais de vapeur. Il en a été de même pour tout le matériel électromécanique, qui, d'après les marchés passés avec les constructeurs, doit être capable de supporter une surcharge permanente de 20 pour 100. Nous verrons plus loin que cette sécurité est de beaucoup dépassée.

Pour répondre au but de simplicité, les chaudières sont choisies du système Lancashire, à double foyer intérieur et grand volume d'eau. Ces chaudières sont en effet d'une conduite extrêmement simple, d'un nettoyage facile, et leur seul inconvénient est d'être plus encombrantes que les chaudières multitubulaires, ce qui n'a pas d'importance dans le cas présent.

Enfin, pour assurer leur marche économique, elles ont été munies de surchauffeurs et d'un économiseur.

Les machines à vapeur ont été choisies à pistons, non pour cause de simplicité, car les turbines actuelles sont en général plus facile à conduire que les machines à pistons, mais par raison d'économie. L'obligation de diviser l'installation en petites unités, pour avoir toujours des rechanges et permettre de bien graduer les mises en marche suivant les consommations, a conduit à adopter, pour les premières machines installées, des unités de 200 kW. Or, pour cette puissance, une turbine cesse d'être économique, tandis que les machines à pistons le sont encore. Pour faciliter les démontages et remplacements, et pour diminuer le poids des machines électriques, on a choisi la commande par courroie, plus encombrante il est vrai, mais dans les circonstances actuelles l'encombrement ne joue qu'un rôle secondaire.

Les alternateurs choisis sont à faible vitesse, 500 tours seulement à la minute. Ces machines sont largement ventilées et, même en surcharge, n'atteignent qu'une température insignifiante. Elles sont donc susceptibles de supporter des à-coups importants (démarrage des treuils de mine), d'autant plus que leur construction mécanique, très robuste, s'y prête parfaitement. Tous les appareils de tableau sont, de même, largement calculés et l'on a multiplié les appareils de contrôle, aussi bien pour la partie mécanique que pour la partie électrique, de façon à se rendre compte en tous temps de toutes les particularités de marche de l'installation.

A cet effet, on a installé des enregistreurs de pression et température de vapeur, de tension aux barres du tableau, de puissance en watts à la sortie des alternateurs, et tous les ampèremètres, voltmètres, manomètres, thermomètres et indicateurs de vide nécessaires.

Le fonctionnement de tous ces appareils a été soigneusement contrôlé à la mise en marche.

Les condenseurs choisis sont du système Westinghouse-Leblanc, avec commande électrique des pompes. La quantité de vapeur à condenser par un seul appareil devait être de 3600 kg pour deux groupes électrogènes, plus 1000 kg environ pour le compresseur, soit 4600 kg en tout. On a choisi un appareil capable de condenser 5000 kg à l'heure, et laissé la place pour un deuxième appareil semblable, ou plus puissant, qui devra condenser la vapeur du troisième groupe électrogène et sera établi suivant les besoins.

Le condenseur est complété par un réfrigérant à tuyères, système Korting, capable d'abaisser de 16° au maximum la température d'une masse d'eau de 225 m³ à l'heure. On a choisi le système à tuyères de préférence au système à cheminée par suite des vents violents qui soufflent parfois dans la région et compromettent la solidité des édifices élevés.

L'installation intérieure de la Centrale est complétée par un pont roulant à bras, d'une force de 12,5 tonnes.

La description détaillée du matériel installé avec les résultats d'essais est donnée ci-après.

I. PARTIE MÉCANIQUE. — *Chaudière*. — Chacune des deux chaudières installées est munie d'un surchauffeur capable d'élever la température de la vapeur à 325°C. et l'ensemble est complété par un économiseur système Lucien Neu, suffisant pour trois unités. Cet économiseur se distingue de ceux du type ordinaire en ce sens qu'il n'est pas soumis à la pression de la chaudière, les pompes d'alimentation étant placées entre lui et cette dernière, il en résulte que l'on peut avoir des tubes économiseurs plus minces et par conséquent plus efficaces que dans le cas ordinaire. En outre ce dispositif a l'avantage de diminuer le nombre des appareils soumis à une haute pression et d'augmenter en conséquence la sécurité. La surface de l'économiseur est de 200 m². Pour éviter la formation de vapeur dans ses tubes, il reçoit l'eau en charge et pour cela la bêche d'alimentation est installée sur un pylône, à 10 m au-dessus du niveau supérieur de l'économiseur.

Par raison de sécurité les appareils d'alimentation sont en double, savoir : une pompe à pistons à trois corps et commande électrique, destinée à la marche normale, et une pompe Worthington à vapeur, de secours.

Un compteur, intercalé dans la tuyauterie d'alimentation, permet de contrôler la quantité d'eau vaporisée.

La tuyauterie réunissant les chaudières entre elles, avec les anciennes chaudières du puits et avec la salle des machines, prévue pour l'emploi de vapeur surchauffée, est entièrement en tôle d'acier, avec brides mandrinées sans aucune soudure au cuivre, ni aucune pièce de bronze, de même toutes les soupapes sont entièrement en acier, sans aucune pièce en fonte ordinaire ou en bronze.

La conduite de vapeur, allant de la chaufferie à la salle des machines, est double, de façon à assurer le service, en cas d'avarie ou de réparation de l'une ou de l'autre conduite. De même, en cas d'accident aux chaudières du puits central, on peut lui envoyer de la vapeur des nouvelles chaudières au travers d'un détendeur qui abaisse sa pression.

Tous les soins ont été apportés dans la construction de ces chaudières à grand volume d'eau et forte pression. En particulier, les tubes-foyers sont ondulés dans toute leur longueur. Les ondulations sont obtenues par le procédé Maciejewski, c'est-à-dire par la compression du tube, chauffé au rouge vif, sur une bande annulaire de la largeur du renflement à obtenir. Ce procédé permet d'obtenir les ondulations sur le tube complètement soudé, et est supérieur au procédé par laminage.

Les principales dimensions de chaque chaudière, avec leurs conditions de fonctionnement, sont réunies dans le Tableau ci-dessous :

Timbre de la chaudière	12 kg par cm ²
Surface de chauffe.....	120 m ²
Diamètre.....	2,400 m
Longueur.....	10,950 m
Surface du surchauffeur	54 m ²
Production totale de vapeur.....	2400 kg à l'heure

Vaporisation par kilogramme de charbon, la température initiale de l'eau d'alimentation étant de 40° C. et le charbon employé ayant un pouvoir calorifique de 7500 calories, contenant 15 pour 100 de fines et 10 pour 100 de cendres :

1° Vapeur saturée, sans surchauffeurs ni économiseurs.....	kg 7,7
2° Avec emploi de surchauffeurs seuls (325°).....	7,35
3° Avec emploi d'économiseurs seuls chauffant l'eau à 90°.....	8,5
4° Avec emploi d'économiseurs (90°) et de surchauffeurs (325°).....	7,85

Les chiffres ci-dessus s'entendent par kilogramme de charbon sec et net (cendres et humidité déduites).

Au moment de la mise en service de la Centrale il a été fait un essai de vaporisation, combiné avec un essai des machines à vapeur.

Cet essai a donné les chiffres suivants (voir *fig. 7*) :

Pression maximum de vapeur	12,5 kg par cm ²
» minimum »	9,5 »
» moyenne »	11 »
Production moyenne de vapeur.....	1710 kg à l'heure
Température de l'eau d'alimentation	15° C.
Température maximum de la vapeur.....	380° C.
Production de vapeur par kilogramme de charbon brut (compris cendres et humidité)	6,785 kg

Après six mois de fonctionnement, les chaudières ont été soumises à des essais complets, résumés dans les Tableaux ci-après I, II et III.

TABLEAU I.

Résumé des résultats d'essais de la chaudière n° 800.

	21 avril 1914.	22 avril 1914.
Surface de chauffe de la chaudière (m ²).....	120	120
Surface de grille (m ²)	4	4
Rapport de la surface de grille à la surface de chauffe.....	1 : 30	1 : 30
Surface de chauffe du surchauffeur (m ²).....	54	54
Rapport de la surface du surchauffeur à la surface de la chaudière.	1 : 2,22	1 : 2,22
Durée de l'essai (minutes).....	505	455

Combustible :

Pouvoir calorifique (calories)	6748	7070
Consommation totale (kg)	3237	3090
» par heure (kg).....	384,6	407,5
» par heure et par m ² de grille (kg).....	96,1	101,9
» par heure et par m ² de surface de chauffe (kg)...	3,20	3,39

Déchets de combustion :

En tout (kg).	498	392
En pour 100 du combustible (pour 100)	15,4	12,7
Partie combustible restant dans les déchets (pour 100).....	24,1	25,6
Pouvoir calorifique de 1 kg de déchets (calories).....	1952	2073

Eau d'alimentation :

Vaporisé en tout (kg)	21008	21971
» par heure (kg).....	2496	2897
» par heure et par m ² de surface de chauffe (kg)	20,80	24,14
» réduit en vapeur à 100° C. et eau à 0° (kg).....	23,35	27,30
» réduit en vapeur à 12 kg : cm ² et 325° et en eau à 40° C. (702,8 cal).....	21,27	24,86

	21 avril 1914.	22 avril 1914.
<i>Vapeur :</i>		
Pression effective moyenne (kg : cm ²).....	9,7	10,6
Température correspondante (° C.).....	181,8	185,4
Température de la vapeur surchauffée (° C.).....	295	308
Chaleur développée dans la chaudière (calories par kg d'eau).	608,8	605,7
» dans le surchauffeur »	51,8	56,2
» dans l'économiseur »	58	62
» totale »	718,6	723,9

<i>Gaz de combustion :</i>			
Température de l'air à l'entrée (° C.).....	18	18	
Température des gaz chauds à l'arrière de la chaudière (° C.)....	197	238	
Tirage à l'arrière de la chaudière (mm d'eau).....	9,5	12,5	
Composition des gaz à l'arrière de la chaudière en volumes (p. 100).	Acide carbonique..... Oxygène..... Azote.....	11,3 7,6 81,1	11,4 7,6 81,0
Rapport de l'air réellement admis à l'air théorique.....	1,54	1,53	

<i>Vaporisation :</i>		
Vaporisation brute par kilogramme de charbon.....	6,49	7,11
Vaporisation réduite en eau à 0° C. et vapeur à 100° (640 cal) (kg).	7,29	8,04
Vaporisation réduite en eau à 40° C. et vapeur à 12 kg : cm ² et 305° (702,8 cal) (kg).....	6,64	7,32

<i>Économiseur :</i>		
Surface de l'économiseur (m ²).....	200	200
Température des gaz avant l'économiseur (° C.).....	170	210
Température des gaz après l'économiseur (° C.).....	103	110
Chute de température des gaz dans l'économiseur (° C.).....	67	100
Température de l'eau à l'entrée (° C.).....	10	11
Température de l'eau à la sortie (° C.).....	58	62
Élévation de température dans l'économiseur (° C.).....	48	51
Différence moyenne de température entre les gaz et l'eau (° C.)..	102,5	128,5
Composition des gaz à l'arrière de l'économiseur en volumes (p. 100).		
Acide carbonique.....	6,4	6,8
Oxygène.....	13,2	12,9
Azote.....	80,4	80,3
Rapport du volume d'air réellement admis au volume d'air théorique.....	2,61	2,50
Quantité de chaleur emportée par l'eau par heure (calories)....	119808	147747
Coefficient de passage de la chaleur.....	5,8	5,7
Tirage à l'arrière de l'économiseur (mm d'eau).....	13,4	10,0

Bilan de chaleur.

	21 avril 1914.		22 avril 1914.	
	Calories.	p. 100.	Calories.	p. 100.
Utilisé par la vaporisation par kilogramme de charbon..	3951	58,85	4306	60,90
» pour la surchauffe ..	336	4,98	399	5,65
» dans l'économiseur ..	377	5,58	441	6,24
Utilisation totale ..	4664	69,11	5146	72,79

Pertes :

Par combustible restant dans les déchets.....	301	4,45	263	3,72
Par chaleur libre restant dans les gaz de combustion...	575	8,52	618	8,74
Par rayonnement, conductibilité, air aspiré.....	1208	17,92	1043	14,75
Somme = Pouvoir calorifique du combustible.....	6748	100,00	7070	100,00

TABLEAU II.

Charbon.

		Désignation du charbon.		
		Non criblé.		Criblé et lavé.
		Pris au stock.	Essai de vaporisation.	Essai de vaporisation.
Date de l'essai (1914).....		20 avril.	21 avril.	22 avril.
Composition du char- bon brut.....	Carbone (pour 100)...		70,10	73,89
	Hydrogène (p. 100)...		4,55	4,68
	Oxyg. et azote (p. 100).		8,06	8,13
	Soufre (pour 100)....	2,08	1,63	1,63
	Cendres (pour 100)...	18,02	13,07	8,53
	Eau (pour 100).....	2,88	2,59	3,14
Composition du char- bon sans eau ni cendres.....	Carbone (pour 100)...		83,12	83,65
	Hydrogène (p. 100)...		5,39	5,30
	Oxyg. et azote (p. 100).		9,56	9,20
	Soufre (pour 100)....		1,93	1,85
Hydrogène contenu dans 1000 parties de charbon pur....	Partie utilisable.....		50,47	49,61
	Partie combinée.....		14,23	13,75
	Total.....		64,70	63,36
Calories contenues dans 1 kg du charbon employé.....		6377	6748	7070
Calories contenues dans 1 kg de charbon pur...		8062	8001	8005
Coke retiré du charbon employé (pour 100)....			72,96	70,71
Composition plus ap- prochée du charbon.	Carbone fixe (p. 100)...		59,89	62,18
	Parties volatiles (p. 100).		24,45	26,15
	Eau.....		2,59	3,14
Composition du char- bon pur.....	Cendres.....		13,07	8,53
	Coke (pour 100).....		71,01	70,39
			28,99	29,61

TABLEAU III.

a. Analyses calorimétriques. — L'analyse calorimétrique de la matière séchée à l'air a été faite dans la bombe Berthelot, par combustion dans l'oxygène concentré.

L'allumage est obtenu à l'aide d'un fil de fer fin, porté à l'incandescence au moyen d'un courant électrique. L'eau formée pendant la combustion se liquéfie dans la bombe; sa chaleur latente de vaporisation, ainsi que les chaleurs de formation et de raréfaction des acides azotique et sulfurique, ont été soustraites du résultat :

Provenance du charbon.	Stock.		Essai du 21 avril.		Essai du 22 avril.	
	I.	II.	I.	II.	I.	II.
Poids de l'eau du calorimètre (g)	2100	2100	2100	2100	2100	2100
Valeur en eau des parties métalliques (g).	300	300	300	300	300	300
Valeur en eau du calorimètre (g)	2400	2400	2400	2400	2400	2400
Poids du charbon brûlé (g)	1,0	1,1	1,0	1,1	1,0	1,1
Élévation de température dans le calorimètre (° C.)	2,791	3,060	2,940	3,228	3,074	3,376
Correction pour pertes par refroidissement (° C.)	0,010	0,010	0,011	0,012	0,010	0,012
Élévation réelle de température (° C.)	2,801	3,070	2,951	3,240	3,084	3,388
Quantité de chaleur observée (cal)	6722	7368	7082	7770	7420	8131
Corrections pour allumage, acides sulfurique et azotique	77	82	66	68	66	71
Chaleur de combustion de la quantité de charbon employée (cal)	6645	7286	7016	7702	7354	8060
Chaleur de 1 g de charbon (cal)	6645	6624	7016	7002	7354	7328
Eau de combinaison de 1 g de charbon (g)	0,430	0,430	0,435	0,435	0,453	0,453
Chaleur latente de vaporisation de cette eau	258	258	261	261	271	271
Pouvoir calorifique de 1 g de charbon sec (cal)	6387	6366	6755	6741	7083	7057
Moyennes (cal)	6377		6748		7070	

b. Analyses chimiques. — Les Tableaux relatifs aux analyses chimiques ne sont pas reportés ici, car les chiffres qu'ils contiennent sont intégralement contenus dans le Tableau II.

Pour déterminer le pouvoir calorifique du charbon, en partant de l'analyse chimique, on a pris la formule

$$P = 8100C + 29000 \left(H - \frac{O + N}{8} \right) + 2500S - 600H^2O.$$

A rapprocher les valeurs données par les deux sortes d'essais :

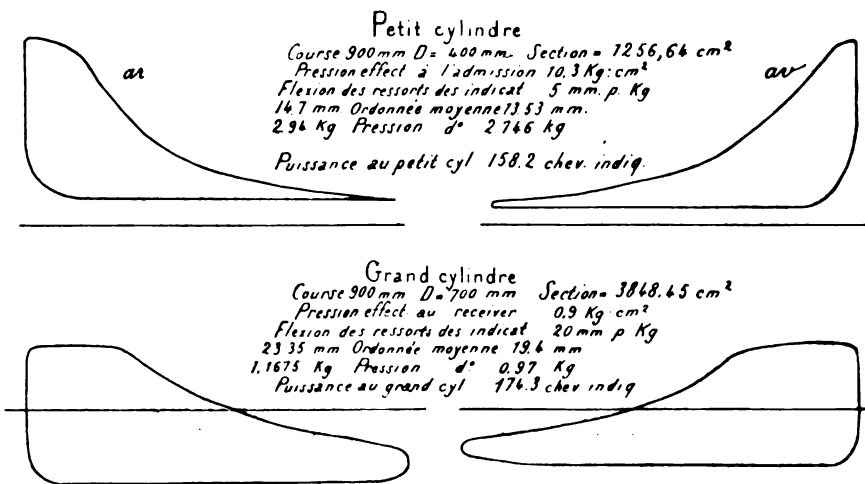
	Charbon du stock non criblé.	Essai du 21 avril non criblé.	Essai du 22 avril criblé.
Analyse chimique (cal).....		6730	7062
Analyse calorimétrique (cal).....	6377	6748	7070

Machines à vapeur. — Les principales dimensions et conditions de fonctionnement des machines à vapeur sont résumées comme suit :

Pression de vapeur à l'admission au petit cylindre.	10 kg : cm ²
Vitesse de rotation.....	110 t : m
Admission normale en fonction du grand cylindre..	$\frac{1}{18}$
Puissance indiquée normale.....	355 chevaux
» effective »	320 »
Coefficient d'irrégularité par tour.....	$\frac{1}{200}$
Course des pistons.....	900 mm
Diamètre du petit cylindre.....	400 »
» du grand cylindre.....	700 »
Poids du volant.....	10000 kg
Largeur de la courroie.....	800 mm

Les garanties données par le constructeur, pour une pression de 10 kg effectifs à l'admission et un vide de 89,5 pour 100 au condenseur sont indiquées ci-dessous :

Admission au petit cylindre en fonction du volume du grand cylindre.	Chevaux		Consommation de vapeur par cheval-heure indiqué.	
	indiqués.	effectifs.	saturée sèche.	surchauffée.
$\frac{1}{55}$	176	145	5,650 ^{kg}	4,950 ^{kg}
$\frac{1}{30}$	250	215	5,600	4,900
$\frac{1}{25}$	285	250	5,575	4,875
$\frac{1}{20}$	300	265	5,550	4,850
$\frac{1}{18}$	355	320	5,600	4,900
$\frac{1}{16}$	385	345	5,800	5,100
$\frac{1}{14}$	420	380	6	5,300
$\frac{1}{12}$	455	415	6,200	5,500
$\frac{1}{10}$	520	480	7	6,300

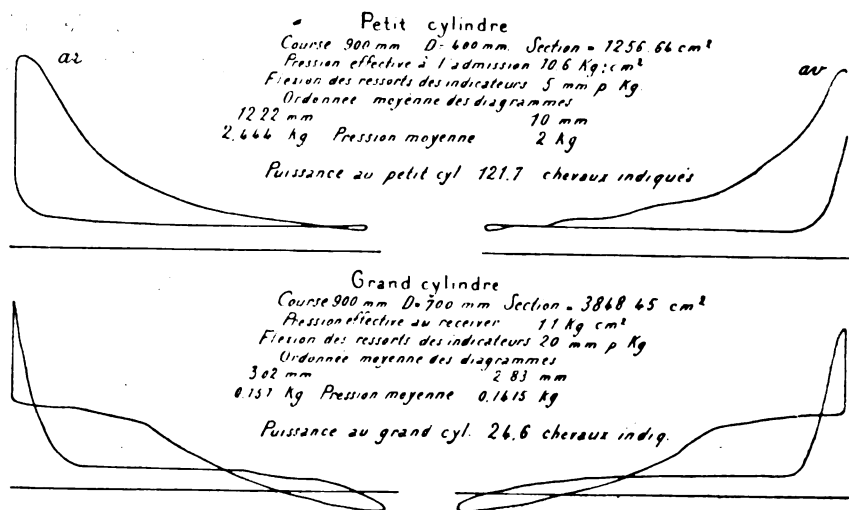


Puissance totale développée 332,5 chevaux indiqués
 Rendement organique de la machine 0,92 (courroie comprise)

Fig. 3.

Série n° 3, machine n° 1085.
 Essai n° V, à condensation.

Puissance au tableau.....	210 kW
Puissance sur l'arbre de l'alternateur.....	306 chx
Rendement de l'alternateur.....	0,9325
Vitesse de la machine à vapeur.....	111 t : m
Température de la vapeur.....	234° C.
Vide au condenseur.....	660 mm Hg
Pression barométrique.....	750 mm Hg



Puissance totale développée 146,3 chevaux indiqués
 Rendement organique de la machine 0,82 (courroie comprise)

Fig. 4.

Série n° 2, machine n° 1081.
 Essai n° II, échappement libre.

Puissance au tableau.....	77,8 kW
Puissance sur l'arbre de l'alternateur.....	120 chx
Rendement de l'alternateur.....	0,88
Vitesse de la machine à vapeur.....	105 t : m
Température de la vapeur.....	255° C.

Les machines installées ont donné lieu à divers essais au cours desquels ont été relevés plus de 80 diagrammes dont deux des plus intéressants font l'objet des figures 3 et 4. Ces relevés ont servi à établir la courbe n° 1, figure 5, représentant le rendement organique des machines et la courbe n° 2, figure 6, représentant les pertes organiques. Tous ces relevés conduisent à des résultats meilleurs que ceux garantis par les constructeurs.

Un essai de consommation, poursuivi pendant 17 heures en mesurant l'eau et le charbon consommés aux chaudières, a donné les résultats suivants :

Vide au condenseur.....	669 mm Hg
Pression barométrique.....	751 »
Vide en pour 100 de la pression barométrique.....	89,1 pour 100
Puissance en chevaux indiqués.....	351 chevaux
» » effectifs.....	323 »
Consommation totale de vapeur par heure.....	1710 kg
» de vapeur par cheval-heure indiqué.....	4,74 »
» » » effectif.....	5,3 »

Ces consommations s'entendent purges comprises.

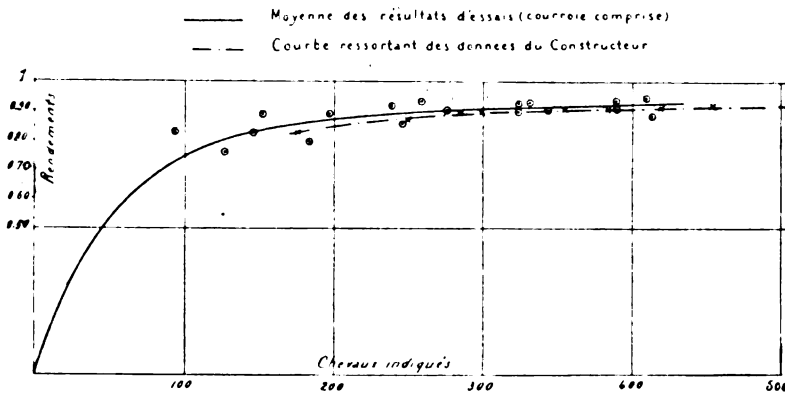


Fig. 5. — Courbe n° 1. Rendement organique des machines à vapeur Dujardin.

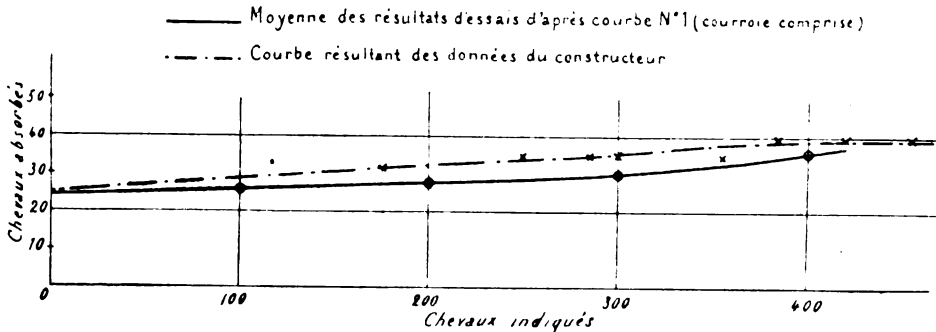


Fig. 6. — Courbe n° 2. Pertes organiques des machines à vapeur Dujardin.

L'essai complet, avec les diagrammes relatifs à la partie électrique, fait l'objet du graphique n° 7, figure 7.

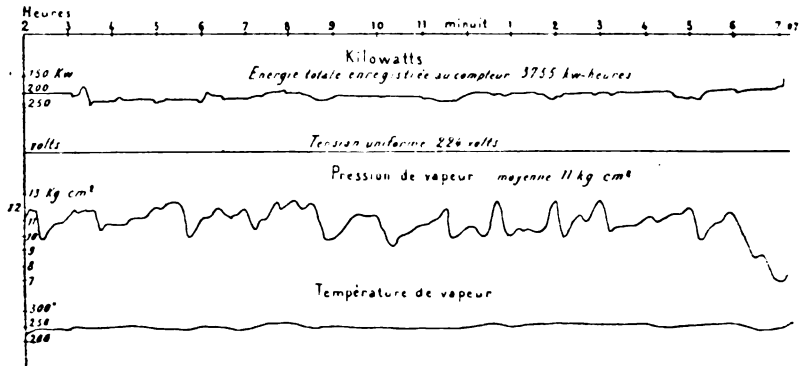


Fig. 7. — Graphique n° 7. Essai de 17^h07^m. Charge moyenne 219.38 kW.

Vide au condenseur.....	667 mm Hg
Pression barométrique.....	751 mm Hg
Eau vaporisée à la chaudière.....	29400 kg
Vapeur par kilowatt-heure.....	7,83 kg (purgés comprises)
Charbon brut consommé totalement.....	4333 kg
Charbon par kilowatt-heure.....	1,154 kg
Eau vaporisée par kilogrammes de charbon...	6,785 kg

D'autres essais de plus courte durée sont résumés dans le Tableau IV

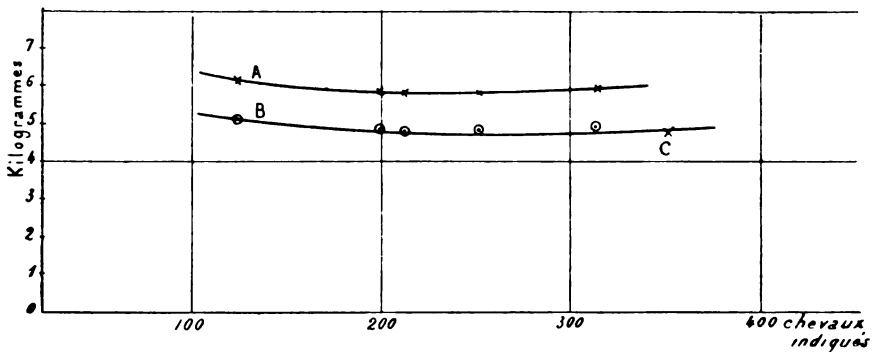


Fig. 8. — Courbe n° 3.

Consommation de vapeur à condensation en kg par cheval indiqué et par heure.

A. Courbe résultant des conditions de l'expérience, soit :

Pression moyenne.....	9,8 kg : cm ² effectifs
Température.....	220° C.
Contrepression au condenseur.....	0,84 kg abs. = vide 91.6 p. 100

B. Courbe résultant de la réduction aux conditions du contrat, soit :

Pression effective.....	10 kg : cm ²
Température.....	275° C.
Vide au condenseur.....	89,6 pour 100

C. Point trouvé directement par l'essai de 17^h.

ci-dessous, et l'ensemble de ces mesures a permis de tracer la courbe de consommation n° 3, figure 8.

Les plus fortes charges obtenues aux essais ont été de 38g,6 chevaux

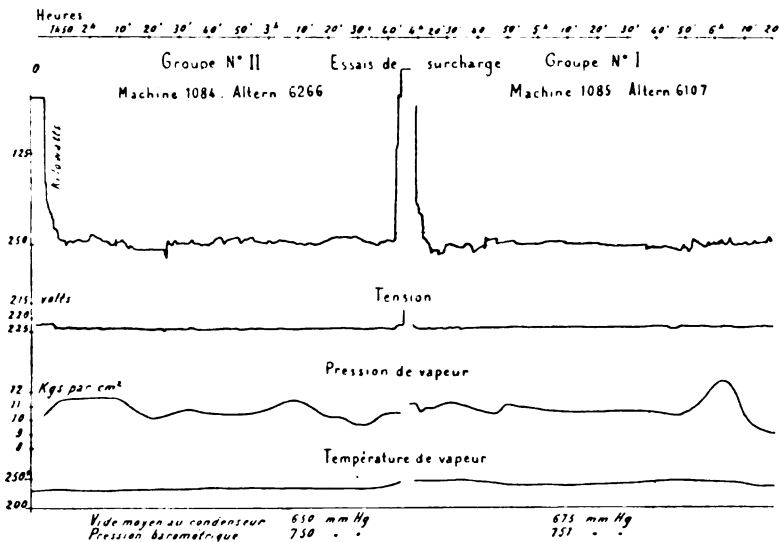


Fig. 9. -- Graphique n° 5.

TABLEAU IV.

Résumé des essais des machines à vapeur.

N° de l'essai.....	I.	II.	III.	IV.	V.
N° de la machine...	1084.	1084.	1084.	1085.	1085.
Durée de l'essai (minutes).....	180	210	245	240	275
Pression de vapeur moyenne (kg : cm²).	7,8	11,0	10,4	10,8	9,0
Température de vapeur moyenne (° C.).	231	220	211	222	216
Pression absolue au condenseur (mm Hg).	68	57	57	58	70
Puissance indiquée moyenne (chevaux indiqués).....	313,7	198,4	123,5	212,5	252,4
Consommation de vapeur totale (kg)...	5599	3986	3063	4852	6687
Consommation de vapeur par heure (kg).	1866	1132	750	1213	1459
Consommation par cheval indiqué et par heure (kg).....	5,95	5,74	6,07	5,71	5,78
Rendement organique de la machine...	0,91	0,89	0,83	0,91	0,91
Puissance effective sur l'arbre de la machine (chevaux).....	285,0	176,0	102,0	193,0	230,0
Puissance effective sur l'arbre de l'alternateur (chevaux).....	275,0	159,9	84,8	187,4	225,0
Rendement organique total (chevaux sur arbre alternateur) chevaux indiqués)...	0,88	0,806	0,687	0,882	0,895
Différence de température entre la sortie et l'entrée de l'eau au condenseur (° C.).	4,7	3,0		3,2	3,7
Quantité d'eau d'injection au condenseur en mètres cubes par heure.....	228,1	218,9		218,3	226,6

indiqués à échappement libre, et 413,6 chevaux indiqués à condensation, soit environ 27,4 pour 100, au delà de la puissance de 324 chevaux indiqués, correspondant à la puissance normale de 200 kW des alternateurs. Il n'a pas été possible d'aller plus loin aux essais, par suite du glissement des courroies neuves et encore insuffisamment souples, mais les machines sont susceptibles de développer 520 chevaux indiqués, soit une surcharge de 60 pour 100. Ces essais font l'objet du graphique n° 5, figure 9.

Condenseur et réfrigérant. — Le condenseur Westinghouse-Leblanc est muni d'un casse-vide de grande section, type « Condensation-Centrale » analogue à ceux installés aux mines de Lens, ainsi établi par suite du grand volume des tuyauteries de liaison entre les machines à vapeur et le condenseur. Il est muni en outre de l'appareil de réglage d'eau breveté par

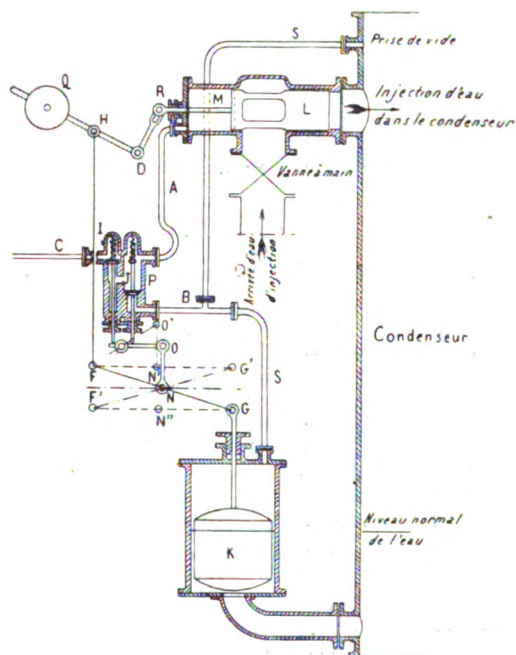


Fig. 10. — Appareil automatique de réglage d'eau pour condenseurs.

les Mines de Lens, décrit dans le *Bulletin de la Société de l'Industrie minière*, août 1912, installé en vue de parer aux variations continuelles du volume de vapeur à condenser. Comme, par raison de sécurité, le casse-vide est installé tout près du niveau maximum de l'eau, ces variations auraient pour objet de soulever le clapet de cet appareil, et en conséquence de faire tomber le vide, ce qu'il faut éviter à tout prix, si l'on ne prenait la précaution

de régler fréquemment l'arrivée d'eau au condenseur. Pour éviter une surveillance onéreuse, on a donc installé l'appareil automatique en question, représenté schématiquement par la figure 10.

Il est constitué par le flotteur K, agissant sur un piston-valve L, par l'intermédiaire d'un distributeur asservi P.

La figure représente le piston-valve dans sa position d'ouverture complète, position occupée au moment de la mise en marche.

Si le niveau d'eau vient à monter dans le condenseur, le flotteur K se soulève et fait tourner le levier FG autour du point F qui fait à ce moment l'office d'un point fixe. Le point G tend à venir occuper la position G'. Mais pendant cette opération le point N se déplace et tend à venir occuper la position N'. La bielle NO fait tourner le levier OE autour du point fixe E, ce qui produit le soulèvement de la soupape J du distributeur P. Cette soupape met en communication, par le tuyau A, l'espace M placé derrière le piston-valve L, avec la partie supérieure du condenseur où règne le vide. Le contre-poids Q ramène le piston en arrière en lui faisant recouvrir l'orifice d'injection d'eau. Ce mouvement se continue jusqu'à ce que l'eau, agissant sur le flotteur K, ait repris son niveau normal.

Le mouvement en arrière du piston-valve a pour effet de faire tourner le levier coudé RDH autour du point fixe et d'abaisser la tige HF. Le point F tend à occuper la position F' et le levier FG, oscillant autour du point G, ramène le point N dans la position primitive, ce qui a pour résultat la fermeture de la soupape J.

Le piston-valve reste donc dans la position qui correspond au niveau d'eau normal, en ouvrant l'injection d'eau de la quantité exactement nécessaire pour compenser l'eau évacuée par la pompe d'extraction du condenseur.

Si le niveau d'eau s'abaisse, le flotteur K redescend en ramenant le point G dans sa position inférieure. Comme à ce moment l'injection d'eau est supposée fermée, le point F occupe la position F' et le point N s'abaisse en N'. La bielle NO fait tourner le levier OE en sens inverse du mouvement précédent et la soupape I se soulève pour donner passage au courant d'eau sous pression arrivant par le tuyau C. L'eau sous pression passe par le tube A et vient pousser le piston-valve en remplissant la chambre M. Le piston-valve ouvre alors l'injection d'eau de la quantité nécessaire, et un équilibre s'établit dans la position du flotteur et du piston, le point N remonte à sa place et la soupape I se ferme. Le piston-valve est maintenu en place par l'eau qui emplit la chambre M.

Une légère fuite des clapets et du piston-valve est sans inconvénient, l'appareil se règle de lui-même pour réparer les fuites.

Le tuyau S met en communication avec la partie supérieure du condenseur,

le réservoir qui contient le flotteur. Pour simplifier il est réuni au tuyau B qui établit le vide sous la soupape J.

La figure 11 est un dessin d'exécution à l'échelle de l'appareil dernier

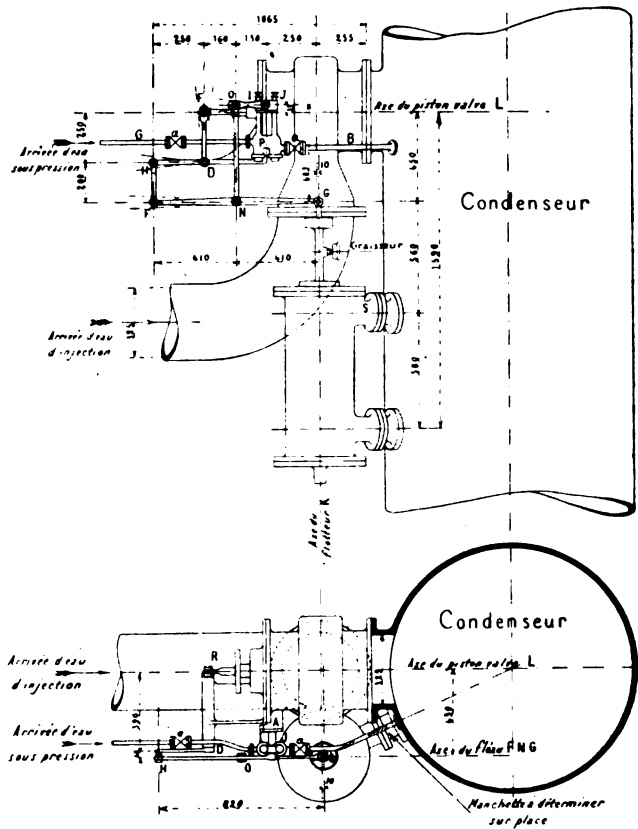


Fig. 11. — Appareil de réglage d'eau pour condenseurs. Disposition d'ensemble.

Les lettres de repère sont les mêmes que celles du schéma descriptif et de la Notice.

modèle, comportant les adjonctions et modifications indiquées par l'expérience. Les lettres de repère de ce dessin sont les mêmes que celles du schéma figure 10.

Le fond supérieur du vase contenant le flotteur K a été muni d'un tube-guide avec graisseur et garniture hydraulique, guidant la tige commandant le servo-moteur, tout en évitant absolument la rentrée d'air. L'évacuation B et la prise de vide S ont été séparées l'une de l'autre, leur réunion ayant montré des inconvénients. Le logement du piston-valve L a été muni d'un graisseur et le contrepoids Q supprimé comme inutile.

Pour éviter les pompages dus à l'extrême sensibilité de l'appareil, deux

robinets d'étranglement α , α ont été placés de part et d'autre du distributeur P.

Le condenseur est établi pour les conditions de fonctionnement suivantes :

Quantité de vapeur à condenser par heure.....	5000 kg	2500 kg
Pression de refoulement de la pompe d'extraction..	10 m	10 m
Température de l'eau d'injection.....	25°	25°
Quantité d'eau d'injection par heure.....	207 m ³	207 m ³
Température de l'eau à la sortie.....	38°	32°
Rapport du vide obtenu au vide théorique.....	98 p. 100	94 p. 100
» » » absolu.....	88,8 p. 100	89,5 p. 100

Le condenseur a été soumis à divers essais, notamment afin de déterminer l'efficacité de la pompe à air. Comme exemple sont indiqués ci-dessous les chiffres de l'essai à vide, c'est-à-dire sans vapeur :

Pression de refoulement de la pompe d'extraction..	10 ^m
Température de l'eau d'injection.....	15°
Pression barométrique.....	750 mm
Vide moyen obtenu.....	730 mm
Vide théorique.....	737,5 mm
Rapport du vide obtenu au vide théorique.....	99 p. 100
» » » absolu.....	97 p. 100
Puissance absorbée par la pompe.....	35 kW
Soit en chevaux sur l'arbre.....	40 chx

Les chiffres relatifs aux essais en charge sont indiqués dans le Tableau IV.

La pompe d'extraction refoule dans les tuyères d'un réfrigérant système Kœrting, établi pour les conditions de fonctionnement ci-dessous :

Température ambiante.	Température de l'eau à la sortie du réfrigérant.
40°	33°
30	28
25	27
20	25
16	24

Ces températures de sortie s'entendent pour une pression de 10 m aux tuyères, un degré hygrométrique moyen de 50 pour 100 et une quantité d'eau à refroidir de 225 m³ à l'heure.

Avec le débit normal, en admettant un rendement de 0,6 pour la pompe, la puissance absorbée par le réfrigérant seul est donc de

$$\frac{207000 \times 10}{3600 \times 75 \times 0,6} = 13,3 \text{ chevaux environ.}$$

Cette puissance est peu importante, comparativement aux services rendus par l'appareil.

Pendant tous les essais exécutés sur le condenseur, au lieu de mesurer le vide en centimètres de mercure, qui doit être comparé avec la pression atmosphérique, on a mesuré la pression absolue à l'intérieur du condenseur au moyen d'un baromètre de machine pneumatique, composé d'un simple tube de verre recourbé en forme d'U, comme le montre la figure 12. Cet appareil

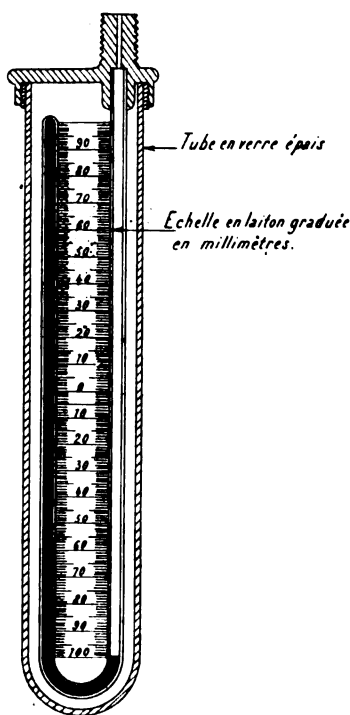


Fig. 12.

très simple, que nous voudrions voir monté en permanence sur tous les condenseurs, a l'avantage de donner sans calcul la pression absolue, seule intéressante à connaître, au lieu de la hauteur de mercure maintenue en suspension par le vide du condenseur, hauteur qui doit toujours être comparée à la pression atmosphérique ambiante.

Pour la même raison, nous préconisons l'emploi sur les condenseurs d'un manomètre enregistreur conçu comme l'indique le croquis schématique (fig. 13). En A et B sont deux diaphragmes métalliques analogues à ceux des baromètres anéroïdes, soumis tous deux à la pression atmosphérique sur leur face extérieure. Le diaphragme A est soumis, sur sa face intérieure, à la pression absolue régnant dans le condenseur, tandis que le diaphragme B

forme le couvercle d'une chambre dans laquelle règne le vide barométrique. Une tige C relie les deux diaphragmes et l'on conçoit que les mouvements de cette tige dépendront uniquement de la pression absolue régnant à l'intérieur du condenseur, puisque les efforts exercés sur A et sur B par la pression atmosphérique s'annulent, étant de même valeur et de sens contraire. Pour simplifier les schémas, l'aiguille D, oscillant autour du point E, est reliée

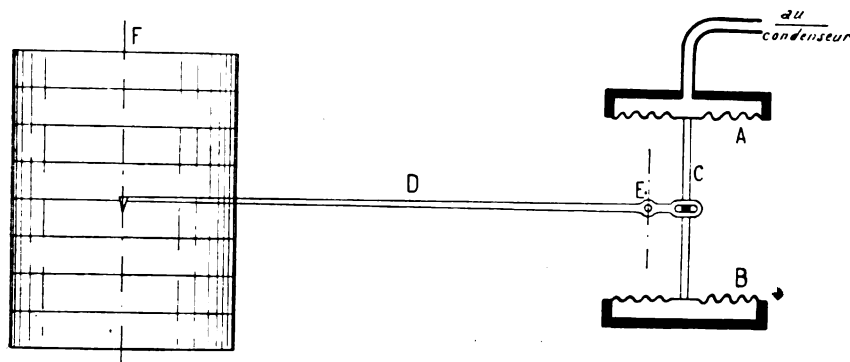


Fig. 13. — Manomètre différentiel enregistreur indiquant la pression absolue à l'intérieur des condenseurs.

Croquis schématique :

- AB. Diaphragmes.
- C. Tige reliant les diaphragmes.
- D. Aiguille porte-plume.
- E. Point de rotation de l'aiguille.
- F. Tambour enregistreur à mouvement d'horlogerie

directement à la tige C, mais il est entendu qu'un mécanisme amplificateur sera intercalé entre cette aiguille et la tige C, comme dans la plupart des appareils de ce genre.

En F est un tambour enregistreur qui peut être gradué en millimètres de mercure ou kilogrammes par centimètre carré.

II. PARTIE ÉLECTRIQUE. — *Alternateurs.* — Les alternateurs du type à 3 paliers, pour commande par courroie avec excitatrice en bout d'arbre, ont été soumis à de nombreux essais, tant en ateliers que sur place, après montage. Ci-dessous sont indiqués quelques chiffres permettant de comparer les garanties avec les résultats obtenus :

	Garanties.	Résultats d'essais.
Puissance continue effective à 500 t : m avec $\cos \varphi = 0,8$	200 kW	
Soit puissance apparente	250 kVA	
Puissance effective en surcharge.....	240 kW	256 kW max.
» apparente »	300 kVA	285 kVA max. ($\cos \varphi = 0,9$)
Tension normale à 50 $\frac{r}{s}$ par seconde.....	220 volts	224 volts
Essais de surtension entre bobines du stator et masse, et entre bobines inductrices et masse.	1000 volts	1000 volts

	Rendements			
	$\cos \varphi = 1.$	$\cos \varphi = 0,8.$	$\cos \varphi = 1.$	$\cos \varphi = 0,8.$
Pleine charge.	0,93	0,915	0,935	0,92
Trois quarts de charge.	0,915	0,9		
Demi-charge.	0,89	0,875		
Un quart de charge.	0,83	0,81		
Échauffement (au-dessus de l'ambiante) avec pleine charge, après 10 heures de marche.			Mesuré avec 9,5 p. 100 de surcharge après 17 h de marche.	
			Garanti.	
Enroulement du stator.			50 ⁰	35 ⁰
Fer.			50	27
Paliers.			50	12
Rotor.			50	16

On voit, par les chiffres d'échauffement, que les alternateurs peuvent supporter une surcharge bien plus élevée que les 20 pour 100 garantis.

S'il n'a pas été possible d'aller au delà de 256 kW, soit 28 pour 100 de surcharge, c'est pour la raison indiquée plus haut pour les machines à vapeur, soit le glissement des courroies. Ce glissement s'atténuera lorsque les courroies auront été assouplies par un certain temps de service; toutefois, il subsistera toujours partiellement et atténuera ainsi les effets des surcharges brusques, telles que celles résultant de courts circuits. Une autre sécurité du même genre est donnée par le glissement possible des volants et des manivelles, non clavetés sur les arbres des machines à vapeur.

Transformateurs. — Les deux transformateurs élévateurs de la station centrale sont établis pour :

Une puissance de 280 kVA ;

Rapport de transformation $\frac{220}{5500}$ volts ;

Type à 3 colonnes verticales dans l'huile, à refroidissement naturel par l'air ambiant.

Le Tableau ci-dessous permet de comparer les garanties données avec les résultats obtenus en ateliers et sur place après montage :

Rendements.	Garantis.		Mesurés.	
	$\cos \varphi = 1.$	$\cos \varphi = 0,8.$	$\cos \varphi = 1.$	$\cos \varphi = 0,8.$
Pleine charge.	0,975	0,972	0,9795	0,9744
Trois quarts de charge.	0,975	0,972	0,9795	0,9744
Demi-charge.	0,971	0,9735	0,97925	0,9741
Un quart de charge.	0,95	0,937	0,969	0,9612
Chute de tension entre marche à vide et pleine charge.	1,6 p. 100	3,8 p. 100	1,36 p. 100	1,64 p. 100

	Garantis.	En atelier.	Après montage.
Essais de surtension.....	13000 volts	15000 volts	10000 volts
Basse tension.....	1000 volts	1000 volts	1000 volts
Échauffement au-dessus de l'ambiante après montage : après 17 heures à 219 kw, soit 243 kVA ($\cos \varphi = 0,9$).			
Pleine charge : garantie, 50°; après montage, 30°.			

Tableau de couplage et de distribution. — Le tableau de couplage et de distribution est muni de tous les appareils de contrôle et de sécurité usuels.

Parmi les appareils qu'il comporte, il convient de signaler les régulateurs automatiques de tension à action rapide système Brown Boveri, décrits dans *La Revue électrique* du 4 avril 1913, et montés chacun sur le circuit d'un alternateur.

Pour la marche en service normal, les régulateurs ont été ajustés pour une

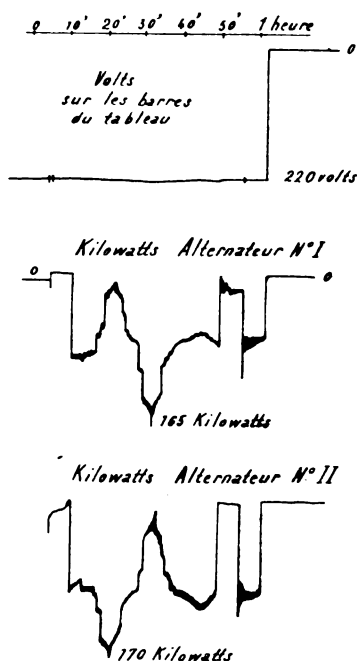


Fig. 14. — Essai de réglage automatique de la tension avec deux machines en parallèle.

Le voltage a été maintenu constant par les régulateurs de tension automatiques.

La variation de puissance a été obtenue en agissant sur les régulateurs des machines à vapeur.

tension de 224 volts. Les expériences dont ils ont été l'objet ont permis de constater que les deux alternateurs, marchant en parallèle, ne peuvent pro-

duire un courant d'échange supérieur à 5 pour 100 de leur puissance normale.

Ces expériences, exécutées sur une résistance liquide, ont permis de tracer le diagramme (*fig. 14*). Les alternateurs fonctionnaient en parallèle, à la puissance de 90 kW environ chacun en moyenne. Par la manœuvre des régulateurs des machines à vapeur, on a porté successivement toute la puissance d'une machine sur l'autre et l'on a constaté que le voltage restait constant, sans courant d'échange appréciable.

Enfin on a déclenché brusquement l'interrupteur de la résistance liquide de façon à annuler la charge, les deux machines restant en parallèle. On a de nouveau enclenché l'interrupteur et, pendant ces deux manœuvres, la tension a varié de 5 pour 100 au maximum pour revenir immédiatement à sa valeur normale. Les positions d'ajustage des régulateurs de tension et des manettes des rhéostats à main ont été indiquées sur les appareils au moyen d'un trait rouge. Aux positions indiquées, le réglage des machines se fait automatiquement entre zéro et la pleine charge et entre $\cos \varphi = 0$ et $\cos \varphi = 1$.

Mesures d'isolement. — Les essais d'isolement ont été exécutés d'abord en ateliers au moyen des appareils de laboratoire de la Société Brown Boveri et répétés sur place de deux façons :

1° Au moyen de la propre tension des alternateurs et transformateurs. Cet

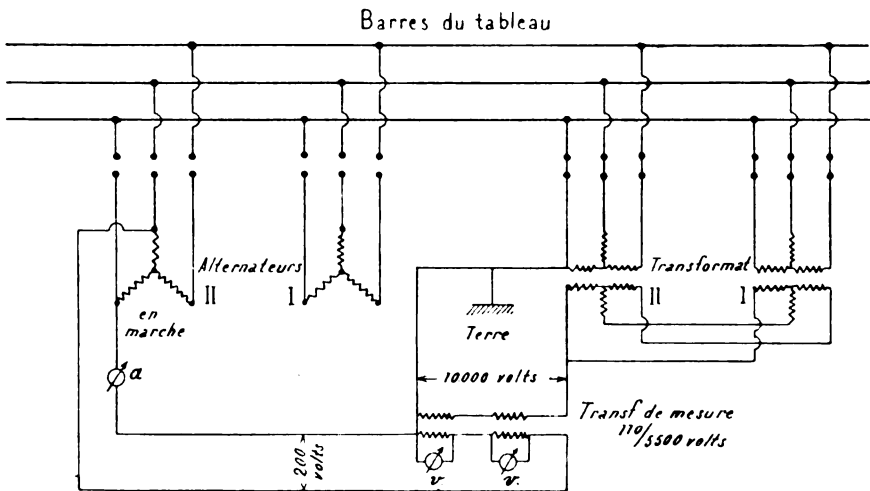


Fig. 15. — Schéma n° 1. Essais d'isolement. Haute tension.

essai a été effectué en poussant la tension des alternateurs au maximum qu'il a été possible d'atteindre à 50 périodes par seconde, soit 272 volts sur

la basse tension. Dans ces conditions on a atteint 6800 volts à la haute tension.

On a mis simultanément à la terre une phase primaire et une phase secondaire. Cette opération a été répétée sur les trois phases successivement et a permis de constater qu'il ne passait à la terre aucun courant appréciable.

2° Le second essai d'isolement a été fait sur la haute tension, en mettant en série les deux transformateurs des voltmètres, ces transformateurs ayant un rapport de $\frac{110}{5500}$ volts, soit 50 pour 100.

En alimentant les deux transformateurs avec 200 volts, on a obtenu une tension secondaire de 10000 volts qui a été appliquée entre les enroulements secondaires des transformateurs principaux et la terre. La durée de cet essai a été de 15 minutes. La basse tension, c'est-à-dire les alternateurs, les barres omnibus, tous les appareils primaires du tableau, l'enroulement

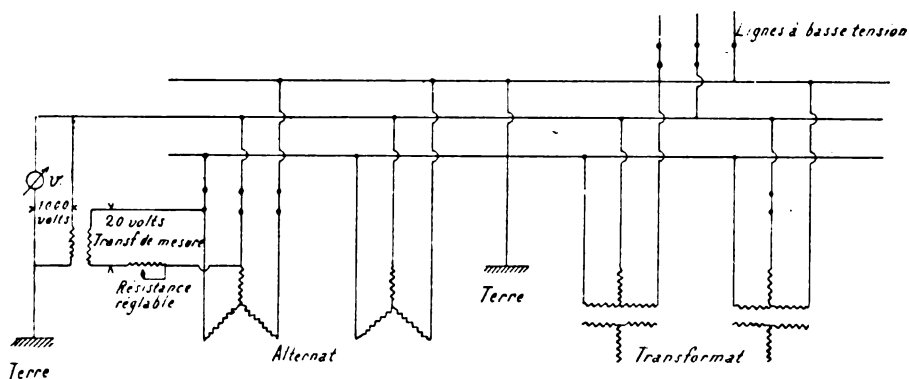


Fig. 16. — Schéma n° 2. Essais d'isolement. Basse tension.

L'essai a été répété successivement sur les trois phases, puis sur les deux alternateurs.

primaire des transformateurs et les lignes aériennes à basse tension, a été essayée à 1000 volts contre la terre en alimentant un transformateur de mesure avec 20 volts sur l'enroulement à basse tension.

Le dispositif employé lors du deuxième essai est représenté par les schémas (fig. 15 et 16).

III. LIGNES DE TRANSPORT ET MACHINES RÉCEPTRICES. — Les machines réceptrices forment deux groupes : celui du puits central et celui du puits Vizirka. Pour alimenter ces deux groupes, les lignes de transport d'énergie sont souterraines pour le fond, et aériennes pour la surface.

Les lignes du fond alimentant le puits central partent directement du tableau à 220 volts de la station centrale. Elles sont constituées par des

câbles en cuivre, recouverts de jute et plomb, armés de feuillard dans les parties horizontales et de fils d'acier torsadés dans les parties verticales (puits de mine). Il y a deux lignes dont une est suffisante pour alimenter tous les appareils récepteurs du fond, et un jeu d'interrupteurs et de disjoncteurs convenablement disposés permet de brancher les récepteurs soit sur l'une ou l'autre ligne, soit sur les deux ensembles.

En général, les deux groupes de conducteurs sont en service simultané et un accident arrivé sur l'un des groupes laisse les appareils en service sur l'autre. Cette disposition fait partie des mesures générales de sécurité adoptées pour tout l'ensemble de l'installation.

Les machines et appareils de la Centrale sont également réunis entre eux par des câbles armés, posés à découvert dans le sous-sol et visitables dans tout leur parcours.

Du tableau à basse tension partent également les lignes aériennes desservant les récepteurs de la surface. Ces lignes sont en cuivre demi-dur pour les faibles sections et en aluminium pour les fortes sections. Au moment de l'acquisition du matériel, les cours relatifs de l'aluminium et du cuivre étaient tels que l'emploi du premier de ces métaux a permis de réaliser une économie de plus de 40 pour 100.

Enfin l'aluminium, posé à découvert dans les vastes espaces déserts de la steppe russe où la surveillance est difficile, tente moins les gens malintentionnés que le cuivre dont la valeur marchande est connue de tous.

La ligne à haute tension du groupe Vizirka est constituée également par des câbles en aluminium posés sur isolateurs en porcelaine à triple cloche.

Les conducteurs aériens à haute et basse tension sont surmontés dans toute leur longueur par une ronce d'acier destinée à les préserver des décharges atmosphériques. Cette ronce est fixée à des fers de lance surmontant tous les poteaux et réunis à la terre à chaque poteau.

Les poteaux d'angle sont en treillis de fer, et les simples poteaux de ligne en bois. Ces derniers ne pénètrent pas dans le sol, mais sont enserrés à leur base dans un ensemble de quatre rails maintenus par des colliers et scellés dans un bloc de béton.

Cette disposition est analogue à celle décrite dans le *Bulletin* de septembre 1913 de la Société des Ingénieurs civils ⁽¹⁾.

La ligne à haute tension aboutit près du puits Vizirka à une sous-station dont le tableau comporte les mêmes appareils de manœuvre, de contrôle et de sécurité que celui de la station centrale. Le courant à 5500 volts est transformé à 280 volts par un transformateur exactement semblable à ceux

(1) P. LECLERC. *Protection des poteaux de lignes électriques aériennes.*

de la station centrale, de telle façon que l'un des transformateurs de la Centrale peut servir de rechange. Les lignes à basse tension partant de ce tableau et se rendant au puits sont en câble armé et disposées en double, de la même façon que le puits central.

Le cadre restreint de cette Note ne nous permet pas de décrire les appareils récepteurs.

Résumé. — Les mines de charbon les plus proches d'Ingouletz sont situées dans le bassin du Donetz, à une distance d'environ 400 km. Il en résulte que le prix du combustible, majoré des frais de transport, est assez élevé et a été un des facteurs qui ont conduit la Direction de la Régie des mines à rechercher les machines les plus économiques possible.

Il résulte des essais effectués (*fig. 7*) que la consommation de charbon brut à pleine charge atteint 1,154 kg : kWh aux barres du tableau, et il semble que ce résultat peut être considéré comme très satisfaisant pour des unités de 200 kW.

Les essais qui sont décrits dans la présente Notice montrent que le matériel est très robuste, susceptible de supporter de fortes surcharges, et soumis avant mise en service aux épreuves les plus complètes. Ceci était nécessaire dans une région éloignée de tout centre industriel autre que les mines de fer, et par conséquent de tout atelier de construction ou de réparation.

Pour les mêmes raisons, on a approvisionné en même temps que les machines un lot important de pièces de rechange.

Enfin on a installé, à la mine, un atelier de réparation, avec une petite fonderie pour les pièces en bronze.

Il semble que tout a donc été prévu, dans la mesure du possible, pour assurer à cette installation un bon rendement et une longue durée.



RÉSUMÉS DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES.

Spécification relative à l'essai des isolateurs

(*Amer. Inst. Elect. Eng.*, octobre 1914).

La spécification dont il s'agit, œuvre d'un Comité spécial de *The American Institute of Electrical Engineers*, se rapporte à l'examen et aux essais des isolateurs à haute tension, employés sur les lignes de transport fonctionnant à des tensions supérieures à 25000 volts. Ce travail est divisé en un certain nombre de Chapitres et comprend certaines méthodes d'essais et d'examen propres à aider l'acheteur dans le choix d'un isolateur, parmi ceux que lui offrent divers fournisseurs. Certaines notes ajoutées à la spécification sont pour servir de guide aux propositions d'essais de plusieurs concurrents. Les principaux Chapitres de la spécification sont divisés comme il suit : parties métalliques, porcelaine, ciment, essais électriques (cette rubrique, très détaillée et complétée par des considérations expérimentales formant Appendice), types d'isolateurs de poteau, types d'isolateurs à suspension, et chacun de ces Chapitres est subdivisé en d'autres qui traitent amplement de la nature des essais à effectuer. Ce travail constitue une édition corrigée des spécifications antérieurement publiées par le Comité de l'Institut américain.

ERRATA au *Bulletin* de juillet.

Page 245, ligne 23, *au lieu de* : les compteurs cosinus MR et CPDE, *lire* : le compteur « cosinus MR ».

Page 272, ligne 16, *au lieu de* : dont le dernier modèle porte la marque CPDE. Il diffère, *lire* : dont le dernier modèle diffère, etc.

IL Y A TRENTE ANS.

Avril 1885. — Sur les travaux de M. Gaston Planté : Accumulation et transformation de l'électricité voltaïque, par M. P. SAMUEL. — Perfectionnements récents apportés dans les procédés galvanoplastiques, par M. H. BOUILHET. — Note sur un volt-étalon, par M. A. GAIFFE.

Septembre 1885. — Le transport à grande distance par l'électricité en vue de distribuer automatiquement l'énergie sous ses différentes formes : chaleur, lumière, électricité, action chimique, action mécanique, par M. G. CABANELLAS. — Mesure de l'intensité du magnétisme terrestre, à Majunga (Madagascar), par M. C. HALLEZ.

Octobre 1885. — Les phares électriques, par M. A. DE MERITENS. — Sur les applications médicales de l'électricité, par M. le Dr BOUDET DE PARIS.

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ INTERNATIONALE

DES

ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

Compte rendu de la réunion mensuelle du 4 novembre 1915 : Admission de Membres titulaires, p. 318. — Membres décédés et tués à l'ennemi, p. 318. — Notice sur M. J. Pollard, p. 319. — Circuits à courant continu ou à flux continu en parallèle. Application à un mode particulier de production de courant dans les arbres de dynamos. Machines à pôles conséquents (M. P. Girault), p. 323.

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES, p. 352.

ERRATA, p. 352.

IL Y A 30 ANS, p. 352.

COMPTE RENDU

DE LA

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du jeudi 4 novembre 1915 ⁽¹⁾.

PRÉSIDENCE DE M. E. BRYLINSKI.

La séance est ouverte à 17 h 5 m.

Le procès-verbal de la dernière réunion mensuelle est adopté.

Sont élus membres titulaires de la Société internationale des Électriciens :

(¹) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

MM.

Lallement (Jean), ingénieur diplômé de l'École supérieure d'Électricité, 23, rue de Mantes, à Saint-Germain-en-Laye (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. Janet et Chaumat.

Pecker (Victor-Noël), ancien élève de l'École supérieure d'Électricité, 23, rue de Mantes, à Saint-Germain-en-Laye (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. Janet et Chaumat.

Vellard (Louis-Albert), ingénieur, diplômé de l'École supérieure d'Électricité, 71, rue Rome, à Paris. — Présenté par MM. Janet et Chaumat.

M. le PRÉSIDENT fait part du décès de MM. *Boireaux*, *Ducellier*, *F. de Mendiola* et de M. *J. Pollard* dont il retrace la brillante carrière (*voir* Notice de la page 319); il en exprime les vifs regrets de la Société et adresse ses profondes condoléances aux familles des sociétaires suivants tués à l'ennemi :

M. *Causse*, capitaine d'artillerie, mort en Argonne, le 12 août 1915;

M. *Chalon* (A.), lieutenant d'artillerie, décédé à Bourges des suites de blessures reçues en combattant;

M. *Mathon* (J.-P.-P.), lieutenant au 23^e d'infanterie, promotion E.S.E. de 1912; décoré de la Croix de guerre avec palme, tué à la Fontenelle le 22 juin 1915 :

« S'est maintenu héroïquement pendant quatre heures sous un feu écrasant d'artillerie, ne s'est replié que sur le point d'être entouré de toutes parts, cédant le terrain pied à pied, après avoir perdu plus de la moitié de son effectif et son chef, et allant au-devant des renforts pour repartir à l'attaque » ;

M. *Meyer* (Georges), capitaine au 4^e régiment d'artillerie lourde :

« Dirigeant d'un observatoire (pris violemment à partie par l'artillerie ennemie) les tirs de deux batteries d'artillerie lourde, a continué à commander le feu avec le plus grand sang-froid et a été mortellement frappé à son poste par un obus » ;

M. *Milon* (J.), sous-lieutenant au 201^e régiment d'infanterie, tué le 7 mars 1915, à l'attaque du moulin de Souain, en s'élançant, à la tête de sa section, à l'assaut des tranchées allemandes.

NOTICE SUR LA CARRIÈRE DE POLLARD (JULES-AMBOISE), 1852-1915.

Né le 13 janvier 1852, Pollard entra brillamment à l'École Polytechnique en novembre 1871, en sortit dans les premiers rangs et embrassa la carrière d'ingénieur du Génie maritime. Il passa rapidement par les grades subalternes, devint ingénieur en chef en 1887 et ingénieur général en 1904. Nommé commandeur de la Légion d'honneur en décembre 1910, il obtint finalement en juillet 1912, au départ de M. Korn atteint par la limite d'âge, le grade le plus élevé du corps, celui d'Inspecteur général du Génie maritime. Ayant toujours joui d'une excellente santé et ayant conservé toute sa vigueur intellectuelle et physique, il devait conserver ce poste de longues années, si une mort subite n'était venu le frapper en gare de Saint-Pierre-des-Corps, le 24 août 1915.

Pollard fut successivement en service dans les arsenaux de Cherbourg et de Brest, à l'établissement d'Indret comme ingénieur, puis comme directeur et, à Paris, comme professeur, puis directeur de l'École d'Application du Génie maritime, rapporteur de la Commission des machines et du grand outillage, directeur adjoint et enfin Inspecteur général du Génie maritime.

Dans tous les postes qu'il occupa ainsi successivement, Pollard s'est montré un ingénieur remarquable, tant au point de vue technique qu'au point de vue organisateur et administrateur. D'une humeur toujours égale et d'une très grande bienveillance pour tous, il sut se faire aimer et estimer de tous ceux qui l'approchaient.

Si Pollard s'est montré d'une grande compétence dans toutes les sciences que doit posséder un ingénieur de la Marine, il s'est acquis une notoriété, on peut dire mondiale, en électricité et en théorie du navire.

Dès son entrée en service, Pollard se passionne pour l'étude des appareils électriques. En 1877, d'après quelques indications sommaires fournies par le journal *Scientific American*, il construisit du premier coup des téléphones du système Bell et il fut un des premiers à réussir à établir des communications certaines à grande distance.

Embarqué à bord du *Richelieu*, Pollard établit, en collaboration

avec l'enseigne de vaisseau Journet, un rapport très complet sur les appareils d'éclairage électrique et leurs conditions de bon fonctionnement (4^e livraison de 1879 du *Mémorial du Génie maritime*).

En 1879, il fait en collaboration avec l'ingénieur Garnier des expériences sur les appareils d'éclairage électrique.

Sa grande compétence pour toutes les questions électriques est alors reconnue de tous. En 1883, il est nommé membre de la Commission de la Marine à l'Exposition internationale d'Électricité de Vienne. Il devient ensuite vice-président, puis Président de la Société internationale des Électriciens, membre du Conseil de perfectionnement de l'École supérieure d'Électricité et est désigné en 1889 pour représenter le département de la Marine au Congrès international des Électriciens.

En 1889, il publie au *Mémorial du Génie maritime* (1^{re} livraison, 1890) un rapport très documenté sur les installations d'éclairage électrique à bord des bâtiments de l'escadre.

Pollard a inventé ou perfectionné de nombreux appareils électriques, parmi lesquels on peut citer un poste volant pour la mesure des résistances et un système d'avertisseurs d'incendie. Il a participé aux travaux du Congrès d'Électricité qui a abouti à la fixation des unités C. G. S.

Professeur à l'École d'application du Génie maritime de 1881 à 1887, puis directeur de cette école de 1901 à 1904, Pollard y professa les cours de technologie, de théorie du navire (étude de la stabilité et de la propulsion du navire) et d'artillerie navale.

Il s'adonna tout spécialement à la théorie du navire, qu'il considérait, avec juste raison, comme la science fondamentale de l'ingénieur naval. Il fit paraître tout d'abord un cours autographié, puis, en collaboration avec l'ingénieur de la Marine Dudebout, un *Traité complet de Théorie du Navire*. Cet Ouvrage, connu du monde entier, a été couronné par l'Académie des Sciences (prix extraordinaire de 6000 fr de décembre 1891 et prix Plumey de décembre 1895).

En dehors des spécialités où il fut maître incontesté, en électricité et en théorie du navire, Pollard s'est montré également compétent dans toutes les sciences navales. C'était un esprit encyclopédique, avide de s'instruire des nouveautés de la Science, spécialement en vue de leurs applications aux navires. Il s'intéressa en particulier à

l'Optique qu'il étudia au sujet de l'installation de projecteurs et collabora à l'étude des premiers projets de périscopes pour sous-marins avec l'ingénieur de la Marine Garnier, un des précurseurs dans la conception de ces précieux engins.

Pollard fut membre actif de nombreuses sociétés scientifiques, membre du Conseil de perfectionnement de l'École Polytechnique. A l'Exposition de 1900, il établit le rapport du jury international pour la partie concernant le Génie maritime, les travaux hydrauliques et les torpilles. Il participa ensuite au Congrès de l'Alcool et fut nommé à cette occasion officier du Mérite agricole, décoration rare parmi les ingénieurs du Génie maritime.

En définitive, on peut dire que la mort de Pollard, survenue brusquement, alors qu'il était en pleine santé, prive la Science française d'un esprit encyclopédique des plus distingués dont les travaux, spécialement en électricité et en théorie du navire, ont une réputation universelle.

L'ordre du jour appelle les Communications techniques.

**ÉLÉMENTS DE CIRCUITS A COURANT CONTINU OU A FLUX CONTINU EN PARALLÈLE.
APPLICATION A UN MODE PARTICULIER DE PRODUCTION DE COURANT CONTINU DANS LES
ARBRES DE DYNAMOS. MACHINES A POLES CONSÉQUENTS. EXTENSION AUX MOTEURS
D'INDUCTION.**

I. — ÉLÉMENTS DE CIRCUITS A COURANT CONTINU OU A FLUX CONTINU EN PARALLÈLE.

M. PAUL GIRAULT. — « Considérons (*fig. 1*) deux nœuds O et O' auxquels aboutissent les extrémités communes d'un nombre quelconque n d'éléments de circuits à courant continu ou à flux continu.

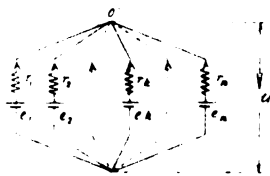


Fig. 1.

» Chacun de ces éléments est le siège d'une force électromotrice ou d'une force magnétomotrice e ; il présente une résistance ou une réluctance r et il est traversé par un courant ou par un flux i .

» L'intensité de courant ou de flux dans l'un des éléments est comptée positivement lorsqu'elle est dirigée de O vers O', en parcourant l'élément, c'est-à-dire suivant le sens des flèches; une force électromotrice ou magnétomotrice a même sens que l'intensité qu'elle produirait dans l'élément correspondant si elle était seule active.

» Nous envisagerons tout d'abord uniquement le cas d'éléments de circuits électriques; la transposition est évidemment immédiate pour le cas d'éléments de circuits magnétiques.

» Nous désignerons par e_1, r_1, i_1 les grandeurs caractéristiques de l'élément d'ordre 1; par e_k, r_k, i_k les grandeurs caractéristiques de l'élément d'ordre k ; etc.

» Désignons par u la différence de potentiel entre O' et O; cette différence de potentiel est positive lorsqu'elle tend à produire, en agissant seule, un courant négatif dans l'un quelconque des éléments en parallèle supposé dénué de force électromotrice ou magnétomotrice. Elle se comporte bien ainsi comme le résidu d'une force

électromotrice ou magnétomotrice après chute de tension dans l'élément de circuit correspondant.

» La seconde loi de Kirchhoff nous donne aussitôt

$$(1) \quad u = e_1 - r_1 i_1 = e_2 - r_2 i_2 = \dots = e_k - r_k i_k = \dots = e_n - r_n i_n;$$

d'autre part, l'application de la première loi à l'un des nœuds O ou O' donne

$$(2) \quad \Sigma i = i_1 + i_2 + \dots + i_k + \dots + i_n = 0.$$

» Or, des équations (1) nous tirons

$$(3) \quad \left\{ \begin{array}{l} i_1 = \frac{e_1 - u}{r_1}, \\ i_2 = \frac{e_2 - u}{r_2}, \\ \dots\dots\dots, \\ i_k = \frac{e_k - u}{r_k}, \\ \dots\dots\dots, \\ i_n = \frac{e_n - u}{r_n}. \end{array} \right.$$

» Ajoutons toutes les équations (3); nous obtenons

$$(4) \quad \Sigma i = \Sigma \frac{e}{r} - u \Sigma \frac{1}{r} \quad (1),$$

d'où l'on tire, d'après l'équation (2),

$$(5) \quad u = \frac{\Sigma \frac{e}{r}}{\Sigma \frac{1}{r}}.$$

» Or, d'après (3), on a pour l'intensité dans le circuit d'ordre k ,

$$(6) \quad i_k = \frac{e_k - u}{r_k};$$

(1) Dans tout notre exposé, le symbole Σ signifie Σ_n , c'est-à-dire une somme étendue à la totalité des n éléments.

en y remplaçant u par sa valeur (5), il vient

$$(7) \quad i_k = \frac{e_k}{r_k} - \frac{\sum \frac{e}{r}}{\sum \frac{1}{r}}.$$

» Les intensités dans les n éléments de circuits sont déterminées par les n expressions telles que (6) ou (7); la formule (5) donne la différence de potentiel entre O' et O .

» *Vérifications.* — Examinons quelques cas particuliers à titre de vérification :

» *a. $n = 1$.* — C'est le cas d'un *circuit ouvert*. Les formules (7) et (5) nous donnent bien

$$i = 0, \\ u = e.$$

» *b. $n = 2$.* — C'est le cas d'un *circuit fermé unique*. Les formules (7) et (5) donnent

$$i_1 = -i_2 = \frac{e_1 - e_2}{r_1 + r_2},$$

expression bien connue;

$$u = \frac{e_1 r_2 + e_2 r_1}{r_1 + r_2}.$$

» *c. Seul, le $n^{\text{ième}}$ élément de circuit comporte une force électromotrice.* — Dans ce cas, les $n - 1$ autres éléments de circuits en parallèle sont de pures résistances et l'élément contenant la force électromotrice débite sur les $n - 1$ autres réunis en parallèle. La formule (5) nous donne ici

$$u = \frac{\frac{e_n}{r_n}}{\sum \frac{1}{r}};$$

et la formule (7)

$$i_k = -\frac{\frac{e_n}{r_n}}{\sum \frac{1}{r}},$$

pour l'intensité dans l'un des $n - 1$ éléments en parallèle. Si nous faisons la somme des courants dans ces $n - 1$ éléments, cette somme est évidemment égale et de signe contraire à l'intensité i_n dans celui

d'ordre n qui contient la force électromotrice; nous obtenons aussitôt

$$-i_n = \sum_1^{n-1} i = -\frac{e_n}{r_n \sum_1^{n-1} \frac{1}{r}},$$

et comme

$$\sum_1^{n-1} \frac{1}{r} = \sum_1^{n-1} \frac{1}{r} + \frac{1}{r_n},$$

il vient

$$i_n = \frac{e_n}{r_n + \frac{1}{\sum_1^{n-1} \frac{1}{r}}}.$$

» Dans cette dernière formule, nous retrouvons bien comme second terme du dénominateur la *résistance réduite* des n premiers éléments, de résistance pure, réunis en parallèle.

II. — APPLICATION AU RÉSEAU MAGNÉTIQUE D'UNE DYNAMO.

» Dans cette application, nous admettons l'hypothèse très simplifiée d'une réluctance négligeable tant pour la culasse de la couronne inductrice que pour le noyau d'induit, et nous négligeons les fuites magnétiques entre pôles inducteurs.

» Nous pouvons alors, comme exemple, représenter le réseau magnétique d'une dynamo tétrapolaire, non munie de pôles supplémentaires, par le schéma de la figure 2.

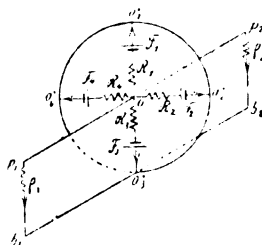


Fig. 2.

» Si les pôles sont supposés fixes et l'induit mobile, le point O représente le noyau d'induit et le cercle de réluctance nulle $O_1' O_2' O_3' O_4'$ représente la culasse de la couronne inductrice; si, au

contraire, l'induit est fixe et le système inducteur mobile, le même schéma s'applique encore, mais le point O représente alors le noyau du système inducteur tandis que le cercle $O'_1 O'_2 O'_3 O'_4$ représente le noyau d'induit; dans les deux cas, le cercle $O'_1 O'_2 O'_3 O'_4$ correspond au point O' de la figure 1.

» Les rayons $OO'_1, OO'_2, OO'_3, OO'_4$ représentent les différents pôles dont les forces magnétomotrices $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_2, \mathcal{F}_3, \mathcal{F}_4$ de signes alternativement contraires sont toutes comptées positivement en allant du centre O vers l'extérieur. Les réluctances correspondantes sont $\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2, \mathcal{R}_3, \mathcal{R}_4$; chacune d'elles est la somme des réluctances d'un noyau polaire et de l'entrefer qui le sépare du noyau d'induit.

» Enfin la droite p, p_2 représente l'arbre, les verticales p, b_1 et p_2, b_2 représentent les deux paliers et la droite b_1, b_2 le bâti. L'élément de circuit magnétique Op, b_1, O'_3 a une réluctance ρ_1 ; l'élément Op_2, b_2, O'_3 a une réluctance ρ_2 ; ces réluctances sont en gros celles des coussinets.

» On obtiendrait aisément le schéma d'une machine tétrapolaire à pôles supplémentaires en intercalant entre les rayons de la figure 2 quatre autres rayons de réluctances r_1, r_2, r_3, r_4 et de forces magnétomotrices f_1, f_2, f_3, f_4 , alternativement de signes contraires, mais toujours comptées positivement en allant du centre vers l'extérieur. Chacune des forces magnétomotrices f est l'excès de la force magnétomotrice d'un pôle supplémentaire sur celle correspondante de l'induit, laquelle est la moitié de celle d'induit comprise entre deux pôles supplémentaires.

» Cette représentation, dans le cas de pôles supplémentaires, est évidemment très simplifiée; *il faut donc ne l'employer qu'avec prudence* et ne lui demander que des résultats qualitatifs.

» Par extension, nous imaginons aussitôt le schéma d'une machine $2p$ -polaire, le nombre $2p$ étant quelconque. Considérons une telle machine, et soient alors :

F la différence de potentiel magnétique (correspondante à u) entre le cercle extérieur O' et le centre O ;

$\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_2, \dots, \mathcal{F}_k, \dots, \mathcal{F}_{2p}$ les forces magnétomotrices des diverses branches radiales;

$\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2, \dots, \mathcal{R}_k, \dots, \mathcal{R}_{2p}$ les réluctances correspondantes;

ρ_1 et ρ_2 les réluctances des éléments arbre-palier-bâti définies ci-dessus;

$\Phi, \Phi_2, \dots, \Phi_k, \dots, \Phi_{2p}$ les flux dans les branches radiales;

ψ_1 et ψ_2 les flux dans les éléments arbre-palier-bâti de réluctances ρ_1 et ρ_2 .

» Les forces magnétomotrices et les flux sont tous comptés positivement en allant de O vers O'.

» S'il n'y a pas de pôles supplémentaires, les formules (6) et (7) deviennent par transposition

$$(8) \quad F = \frac{\sum \frac{\tilde{F}}{\mathcal{R}}}{\sum \frac{1}{\mathcal{R}} + \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}};$$

$$(9) \quad \Phi_k = \frac{\tilde{F}_k}{\mathcal{R}_k} - \frac{\sum \frac{\tilde{F}}{\mathcal{R}}}{\mathcal{R}_k \left(\sum \frac{1}{\mathcal{R}} + \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)} \quad (1)$$

ou

$$(9 \text{ bis}) \quad \Phi_k = \frac{\tilde{F}_k - F}{\mathcal{R}_k}.$$

Enfin, en appliquant la formule (7) aux éléments arbre-palier-bâti de force magnétomotrice nulle, nous obtenons immédiatement

$$(10) \quad \left\{ \begin{array}{l} \psi_1 = - \frac{\sum \frac{\tilde{F}}{\mathcal{R}}}{\rho_1 \left(\sum \frac{1}{\mathcal{R}} + \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)}; \\ \psi_2 = - \frac{\sum \frac{\tilde{F}}{\mathcal{R}}}{\rho_2 \left(\sum \frac{1}{\mathcal{R}} + \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)}, \end{array} \right.$$

ou, sous une forme plus simple,

$$(10 \text{ bis}) \quad \left\{ \begin{array}{l} \psi_1 = - \frac{F}{\rho_1}, \\ \psi_2 = - \frac{F}{\rho_2}. \end{array} \right.$$

» Nous utiliserons de préférence l'ensemble des formules (8), (9 bis) et (10 bis) que nous rassemblons ici; nous y joignons la valeur de F dans le cas d'une machine à pôles supplémentaires, valeur que nous désignerons par F_s , et aussi la valeur φ_i du flux dans le pôle

(1) Chacun des Σ comprend $2p$ termes correspondant aux $2p$ pôles, lesquels possèdent tous une force magnétomotrice.

supplémentaire d'ordre l :

$$(11) \left\{ \begin{array}{l} (8) \quad F = \frac{\sum \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}}{\sum \frac{1}{\mathcal{R}} + \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}}, \\ (8_s) \quad F_s = \frac{\sum \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} + \sum \frac{f}{r}}{\sum \frac{1}{\mathcal{R}} + \sum \frac{1}{r} + \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}}; \\ (9 \text{ bis}) \quad \Phi_k = \frac{\mathcal{F}_k - F}{\mathcal{R}_k} \quad (1), \\ (9_s \text{ bis}) \quad \varphi_l = \frac{f_l - F}{r_l} \quad (1); \\ \psi_1 = -\frac{F}{\rho_1} \quad (1), \\ \psi_2 = -\frac{F}{\rho_2} \quad (1). \end{array} \right.$$

» Comme nous le verrons plus loin, il peut être bon d'envisager les flux de fuites $(\psi_1)_p$ et $(\psi_2)_p$ qui vont des deux tronçons de l'arbre aux paliers et à la culasse inductrice; en désignant par $(\rho_1)_p$ et $(\rho_2)_p$ les réluctances correspondantes, les valeurs (11) de Φ_k , φ_l , ψ_1 , ψ_2 restent les mêmes; mais, avant de les employer, on doit remplacer les valeurs de F et de $\mathcal{F}_l$ par les suivantes :

$$(11 \text{ bis}) \left\{ \begin{array}{l} (8 \text{ bis}) \quad F = \frac{\sum \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}}{\sum \frac{1}{\mathcal{R}} + \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{(\rho_1)_p} + \frac{1}{(\rho_2)_p}}, \\ (8_s \text{ bis}) \quad F_s = \frac{\sum \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} + \sum \frac{f}{r}}{\sum \frac{1}{\mathcal{R}} + \sum \frac{1}{r} + \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{(\rho_1)_p} + \frac{1}{(\rho_2)_p}}, \end{array} \right.$$

et il y a lieu d'y ajouter

$$\begin{array}{l} (\psi_1)_p = -\frac{F}{(\rho_1)_p} \quad (1), \\ (\psi_2)_p = -\frac{F}{(\rho_2)_p} \quad (1). \end{array}$$

(1) F ou F_s , suivant que la machine ne possède pas ou possède des pôles supplémentaires.

» Nous laisserons momentanément de côté les machines à pôles supplémentaires.

» Dans une machine dont le bobinage inducteur et le centrage d'induit sont parfaitement exécutés ⁽¹⁾, les réluctances $\mathcal{R}$ étant égales et les forces magnétomotrices $\mathcal{F}$ étant en nombre pair, égales entre elles et alternativement de signes contraires, on a :

$$(12) \quad \left\{ \begin{array}{l} \sum \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} = 0 \\ \text{et, par suite,} \\ F = 0, \\ \psi_1 = 0, \\ \psi_2 = 0, \\ \Phi_1 = -\Phi_2 = \dots = \pm \Phi_k = \dots = -\Phi_{2p} = \pm \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}, \end{array} \right.$$

c'est-à-dire que tous les flux radiaux sont égaux entre eux en valeur absolue, et alternativement de signes contraires, et il n'y a aucun flux ψ dans l'arbre.

» Il peut au contraire y avoir production de flux ψ dans l'arbre si les $\mathcal{F}$ ou les $\mathcal{R}$ ne sont pas égaux entre eux ; dans tous les cas, la condition nécessaire et suffisante pour que les flux dans l'arbre soient nuls est

$$F = 0,$$

ce qui est équivalent, d'après la formule (8), à

$$(13) \quad \sum \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} = 0 \quad (2).$$

» Cette condition (13) sera réalisée si les $\mathcal{R}$ sont égaux entre eux et si en même temps les $\mathcal{F}$ sont égaux entre eux et alternativement de signes contraires. Mais elle peut l'être encore en compensant un $\mathcal{F}$ anormal par une modification du $\mathcal{R}$ correspondant, ou en compensant un $\frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}$ anormal par la modification d'un ou de plusieurs autres $\frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}$, etc.

(1) La machine envisagée ici peut être aussi bien un alternateur à pôles fixes ou mobiles qu'une machine ordinaire à courant continu.

(2) Dans le cas d'une machine à pôles supplémentaires, la condition (13) devient

$$(13_s) \quad \sum \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} + \sum \frac{f}{r} = 0.$$

» Lorsque la condition (13) ou (13₁) n'est pas réalisée, la différence de potentiel magnétique F n'est pas nulle et nous avons dans l'arbre des flux ψ_1 et ψ_2 qui cheminent en son intérieur parallèlement à l'axe, mais en sens inverse l'un de l'autre à partir du croisillon d'induit d'où ils bifurquent. A la traversée des coussinets par l'arbre, ces flux pénètrent dans les paliers à travers les coussinets; l'induction étant à peu près constante dans l'entrefer constitué par le coussinet, le flux ψ traversant normalement la section de l'arbre varie d'une façon sensiblement linéaire le long du coussinet.

» L'arbre tournant, chacune de ses sections dans l'intérieur du coussinet est le siège de forces électromotrices radiales égales entre elles et ayant pour valeur

$$(14) \quad \varepsilon = \frac{n}{60} \psi,$$

n désignant le nombre de tours par minute.

» Le processus de la production de ces forces électromotrices est identique à celui que nous avons indiqué dans une précédente étude (1); mais il y a lieu d'observer que, dans le cas actuel, ces forces électromotrices radiales sont *toujours* d'orientation inverse pour les paliers placés de part et d'autre du croisillon d'induit, puisque ψ_1 et ψ_2 *se tournent le dos* à partir de ce croisillon (2). Si les forces électromotrices radiales dans les sections correspondant à l'une des portées vont de l'axe vers l'extérieur de l'arbre, celles des sections correspondant à l'autre portée vont de l'extérieur vers l'intérieur, de telle sorte que deux forces électromotrices appartenant à chacune de ces catégories *s'ajouteront* en suivant le circuit arbre-palier-bâti, lors d'une perforation simultanée de la couche d'huile en un point de chaque coussinet.

» On remarquera d'ailleurs que ces forces électromotrices sont en général très faibles; l'expérience le montre et le calcul nous le confirmera. Dans certaines conditions franchement anormales, inversion complète d'un pôle par exemple, elles peuvent prendre une réelle

(1) *Bulletin de la Société internationale des Electriciens*, février 1915, p. 47 à 51.

(2) Par suite de l'opposition des orientations des flux ψ_1 et ψ_2 , les forces magnéto-motrices rémanentes laissées par ces deux flux dans la totalité du circuit arbre-palier-bâti sont également en opposition.

importance. Afin de fixer les idées, nous étudierons un exemple numérique.

» *Exemple numérique.* — Nous avons effectué quelques essais très grossiers sur une machine dynamo à courant continu tétrapolaire et à pôles supplémentaires de 68 kilowatts (240 volts, 283 ampères) à la vitesse de 700 tours par minute. L'induit, en tambour-série, comporte 258 conducteurs périphériques. Les quatre bobines inductrices sont en série et chacune d'elles comporte 1200 spires. La réluctance d'un coussinet a été calculée au moyen de la formule

$$\rho = \frac{1}{2\pi l} \log_e \frac{D}{d},$$

D et d désignant respectivement les diamètres extérieur et intérieur du coussinet et l sa portée; nous avons obtenu ainsi

$$\begin{aligned}\rho_1 &= 0,00178, \\ \rho_2 &= 0,000888,\end{aligned}$$

ρ_1 et ρ_2 se rapportant respectivement aux coussinets côté collecteur et côté poulie; nous supposons les réluctances ρ_1 et ρ_2 réduites à ces seules réluctances d'entrefers de coussinets, ce qui est très inexact et tend à nous donner par calcul des flux ψ_1 et ψ_2 trop élevés dans les deux portions de l'arbre.

» Nous faisons encore *abstraction des fuites*, ce qui tend également à nous donner par calcul des valeurs de ψ_1 et ψ_2 trop élevées.

» La réluctance calculée de l'entrefers d'un pôle supplémentaire est

$$r = 0,0084.$$

» Quant à la réluctance $\mathcal{R}$ d'une branche radiale, correspondant à un pôle principal, nous la déduisons de la caractéristique à vide dont chaque point donne une force électromotrice de e volts pour un courant d'excitation i_e , auquel correspond un nombre at d'ampèretours par pôle; le flux Φ correspondant dans l'induit est

$$(15) \quad \Phi = \frac{e \cdot 10^8}{2 \times 258 \times \frac{700}{60}},$$

et nous admettons que la réluctance,

$$(16) \quad \mathcal{R} = \frac{\mathcal{F}^2}{\Phi} = \frac{1,256 at}{\Phi},$$

est la même quelles que soient les anomalies apportées au bobinage inducteur, ce qui est évidemment peu exact.

» Nous avons obtenu ainsi :

i_e en ampères.	$\mathcal{R}$.
5,7.....	0,002 035
5,3.....	0,001 928
5.....	0,001 868
4.....	0,001 609
3.....	0,001 364
2.....	0,001 220

» Les modifications apportées à la machine ont porté sur l'enroulement d'un seul des quatre pôles principaux que nous avons, soit inversé, soit mis hors circuit, de telle sorte que la force magnétomotrice de ce pôle devenait

$$\mathcal{F}_1 = \mathcal{F}(1 + \alpha),$$

$\mathcal{F}$ désignant la force magnétomotrice normale des autres pôles; $\alpha = -2$ pour l'enroulement inversé; $\alpha = -1$ pour l'enroulement hors circuit.

» En désignant par $\Phi_n = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}$ la valeur normale du flux pour l'excitation considérée, et en posant :

$$(17) \quad \left\{ \begin{array}{l} \delta = \frac{\sum \frac{1}{r}}{\sum \frac{1}{\mathcal{R}}} = \frac{\mathcal{R}}{r}, \\ \gamma_1 = \frac{\mathcal{R}}{\rho_1}, \\ \gamma_2 = \frac{\mathcal{R}}{\rho_2}, \\ A = \frac{\alpha}{2\rho(1 + \delta) + \gamma_1 + \gamma_2}, \end{array} \right.$$

les formules (11.) prennent les *formes extrasimplifiées* :

$$(18) \quad \left\{ \begin{array}{l} F_s = A \mathcal{F}, \\ \frac{\psi_1}{\Phi_n} = -\gamma_1 A, \\ \frac{\psi_2}{\Phi_n} = -\gamma_2 A, \\ \frac{\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3}{\Phi_n} = -(1 + A); \\ \frac{\Phi_3}{\Phi_n} = +(1 - A), \end{array} \right.$$

» En désignant par ε_1 et ε_2 les forces électromotrices en volts entre le centre de l'arbre et la périphérie de celui-ci en dedans de chacun des deux paliers côté collecteur et côté poulie, on a :

$$\varepsilon_1 = \frac{700}{60} \psi_1 \cdot 10^8,$$

$$\varepsilon_2 = \frac{700}{60} \psi_2 \cdot 10^8,$$

l'une de ces forces électromotrices devant être prise avec un signe inversé par rapport à l'autre, d'après ce que nous avons dit plus haut, si l'on compte ces deux forces électromotrices positivement pour un sens radial donné.

» Nous avons obtenu à vide sur cette machine, dans l'ordre indiqué (1), les résultats expérimentaux qui suivent, à la vitesse angulaire de 700 t : m ; nous y avons joint quelques valeurs de ε_1 et ε_2 calculées comme nous venons de le dire.

TABLEAU I. — Avec un pôle inversé.

i_e en ampères.	ε_1 en volts		ε_2 en volts	
	mesurée.	calculée.	mesurée.	calculée.
5,3	+0,0606		—0,12	
4	+0,0573	+0,1052	—0,1113	—0,2118
3	+0,051		—0,099	
2	+0,0417	+0,0596	—0,0834	—0,1192
0	+0,018		—0,03	

TABLEAU II. — Avec un pôle hors circuit.

i_e	ε_1 mesurée.	ε_2 mesurée.
5,3	+0,03945	—0,0807
4	+0,0369	—0,075
3	+0,0327	—0,069
2,14	+0,0279	—0,0582
0	+0,01695	—0,0285

(1) L'ordre indiqué, suivi par suite d'un malentendu, donne aussitôt de l'importance aux forces magnétomotrices rémanentes. Les circonstances ne nous ont pas permis de faire des essais plus soignés sur une autre machine.

TABLEAU III. — Avec inducteurs normaux ⁽¹⁾.

i_c	ε_1 mesurée.	ε_2 mesurée.
5,36.....	+0,0117	—0,0153
4.....	+0,012	—0,0159
3.....	+0,01245	—0,0171
2.....	+0,01275	—0,01755
0.....	+0,00129	—0,018

» Bien que l'accord entre les résultats de notre calcul extrasimplifié et ceux de l'expérience soit loin d'être brillant (Tableau I), il peut être néanmoins considéré comme suffisant, car nous avons simplement cherché à obtenir un ordre de grandeur de façon très simple.

» Dans le Tableau I, nous obtenons par le calcul pour l'excitation de 4 ampères

$$(\psi_1)_c = 901\,000,$$

$$(\psi_2)_c = 1\,815\,000;$$

or, les diamètres des portées de l'arbre sont respectivement

$$d_1 = 6 \text{ cm} \quad (s_1 = 28,27 \text{ cm}^2),$$

$$d_2 = 8,2 \text{ cm} \quad (s_2 = 52,81 \text{ cm}^2);$$

les inductions calculées $\mathfrak{w}_c$ à l'entrée de chaque coussinet s'en déduisent

$$(\mathfrak{w}_1)_c = 31\,850,$$

$$(\mathfrak{w}_2)_c = 34\,380;$$

les rapports τ_1 et τ_2 des forces électromotrices mesurées ε_m aux forces électromotrices calculées ε_c ont pour valeur

$$\tau_1 = \frac{(\varepsilon_1)_m}{(\varepsilon_1)_c} = 0,545,$$

$$\tau_2 = \frac{(\varepsilon_2)_m}{(\varepsilon_2)_c} = 0,5.$$

» Les inductions réelles, déduites des mesures, $(\mathfrak{w}_1)_m$ et $(\mathfrak{w}_2)_m$ à

⁽¹⁾ Les résultats du Tableau III nous montrent une légère augmentation des forces électromotrice ε_1 et ε_2 au fur à mesure de la diminution de i_c , pour la machine redevenue normale; ceci peut provenir d'une petite différence d'exécution entre les bobines inductrices, laquelle diminuerait l'action des forces magnétomotrices rémanentes quand l'excitation croît.

l'entrée de l'arbre dans les coussinets, sont donc :

$$(\psi_1)_m = 17\,360,$$

$$(\psi_2)_m = 17\,190.$$

» Les valeurs élevées des inductions calculées et mesurées font ressortir combien notre hypothèse simplificative est insuffisante si l'on veut obtenir un résultat quantitatif assez exact. Il serait d'ailleurs facile d'imaginer un mode de calcul plus rigoureux mais pénible (').

(1) Tout d'abord, nous aurions une approximation plus satisfaisante en tenant compte des réluctances $(\rho_1)_p$ et $(\rho_2)_p$ offertes aux flux de fuites spéciaux $(\psi_1)_p$ et $(\psi_2)_p$ dont nous avons parlé plus haut [formules (11 bis)].

Il est possible de tenir compte de la variation des réluctances des différents tronçons de circuit magnétique en prenant la différence de potentiel magnétique F comme une variable intermédiaire à laquelle on ramène toutes les autres. Nous prédéterminerons :

1° Les caractéristiques C_ψ des flux ψ_1 et ψ_2 en fonction de F ; chacune de ces caractéristiques, comme celles qui suivront, seront déterminées par points, en se donnant une valeur particulière de ψ et en déduisant le F nécessaire correspondant;

2° Les caractéristiques C_p des flux $(\psi_1)_p$ et $(\psi_2)_p$ en fonction de F ;

3° Les caractéristiques C_φ des flux φ de chacun des rayons correspondant aux pôles supplémentaires en fonction de F . Si l'on considère un de ces rayons excité avec une force magnétomotrice f , la force magnétomotrice résiduelle utilisée pour la production du flux dans le rayon est $f' = f - F$. On commencera donc par calculer par points la caractéristique donnant pour chaque rayon le flux φ en fonction de f' , puis on passera immédiatement de cette caractéristique à celle C_φ donnant φ en fonction de F ;

4° En rassemblant toutes les caractéristiques précédentes C_ψ , C_p , C_φ , nous pouvons faire la somme Σ_1 de tous les flux pour chacune des valeurs de F . Nous aurons ainsi une caractéristique résultante C_1 donnant

$$\Sigma_1 = \Sigma\psi + \Sigma p + \Sigma\psi\varphi$$

en fonction de F ;

5° Nous calculons les caractéristiques C_Φ des flux Φ de chacun des rayons correspondant aux pôles principaux en fonction de F ; pour chaque valeur i_e de l'excitation principale, à laquelle correspondent $2p$ forces magnétomotrices radiales $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_2, \dots, \mathcal{F}_{2p}$, nous aurons une série de $2p$ caractéristiques; d'une façon analogue à ce qui a été dit pour les pôles supplémentaires, nous établirons d'abord les caractéristiques donnant pour chaque rayon le flux Φ en fonction de $\mathcal{F}' = \mathcal{F} - F$, puis nous passerons immédiatement de chacune de ces caractéristiques à celle C_Φ donnant Φ en fonction de F ;

6° Pour chaque valeur de l'excitation principale, nous faisons la somme $\Sigma\Phi$ des p flux radiaux principaux, en tenant compte de leurs signes, et nous aurons ainsi une caractéristique résultante C_2 donnant $\Sigma\Phi$ en fonction de F ;

7° Nous établissons de même des caractéristiques C_2 pour différentes valeurs de l'excitation principale. Prenant alors sur ces caractéristiques les différentes valeurs de $\Sigma\Phi$ pour un même F , mais pour différentes excitations, nous établirons une série de caractéristiques C_3 , chacune des courbes C_3 donnant pour une valeur bien déter-

» Dans le même Tableau I, les valeurs correspondant à l'excitation de 2 ampères concordent mieux :

$$\begin{aligned}(\psi_1)_c &= 511\ 000, \\(\psi_2)_c &= 1\ 023\ 000, \\(\mathfrak{W}_1)_c &= 18\ 050, \\(\mathfrak{W}_2)_c &= 19\ 380, \\\tau_1 &= 0,712, \\\tau_2 &= 0,7, \\(\mathfrak{W}_1)_m &= 12\ 800, \\(\mathfrak{W}_2)_m &= 13\ 560.\end{aligned}$$

Cette meilleure concordance s'explique par la moindre saturation, d'où résulte un moindre taux d'augmentation des valeurs réelles de ρ_1 et ρ_2 par rapport à celles admises et une importance moindre des fuites.

» Les cas expérimentaux que nous venons d'envisager sont extrêmement anormaux, et néanmoins les forces électromotrices relevées sur les arbres ne sont pas très importantes; avec les dissymétries de quelques pour 100 que l'on peut avoir en pratique tant sur les forces magnétomotrices $\mathcal{F}$ et f que sur les réluctances $\mathcal{R}$ et r , les flux dans les arbres qui en résultent ne peuvent provoquer que d'assez faibles forces électromotrices continues; même dans les turbo-dynamos puissantes; ces forces électromotrices ne sont guère à craindre.

III. — MACHINES A POLES CONSÉQUENTS.

» Dans les machines à *pôles conséquents* que nous envisageons, le nombre des bobines inductrices est moitié de celui des pôles inducteurs

minée et constante de F la variation de $\Sigma\Phi$ en fonction de l'excitation principale i_e (caractéristiques C_3 à F constant);

8° Considérons la valeur de F se rapportant à l'une des courbes C_3 ; nous trouvons sur la caractéristique C_1 la valeur de Σ_1 correspondant à la valeur considérée de F ; nous cherchons sur la courbe C_3 considérée le point pour lequel

$$\Sigma\Phi = -\Sigma_1;$$

l'excitation correspondante est celle produisant la distribution des flux déterminée par les deux points considérés de la caractéristique C_1 et de la courbe particulière C_3 . est facile de remonter de ces deux courbes à tous les flux correspondants.

Enfin, nous ferons de même pour différentes valeurs de F .

et ces bobines ne sont enroulées que sur des pôles de même nom ⁽¹⁾. Les forces magnétomotrices $\mathcal{F}$ sont donc toutes de même signe, ce qui procure des valeurs élevées de F ⁽²⁾, et les pôles bobinés débitent leur flux à la fois sur les pôles non bobinés et sur les portions d'arbre aboutissant aux coussinets. Dans le cas d'une machine tétrapolaire, par exemple, on observe ainsi en bout d'arbre une apparence de *cinquième pôle* assez inattendue.

» Considérons une telle machine $2p$ — polaire et désignons par Φ_1 et Φ_2 les flux respectivement issus d'un pôle bobiné et d'un pôle non bobiné; par $\mathcal{R}_1$ et $\mathcal{R}_2$ les réluctances radiales correspondantes; posons

$$(19) \quad \left\{ \begin{array}{l} \lambda = \frac{\mathcal{R}_1}{\mathcal{R}_2}, \\ \gamma_1 = \frac{\mathcal{R}_1}{\mathcal{P}_1}, \\ \gamma_2 = \frac{\mathcal{R}_1}{\mathcal{P}_2}, \\ B = \frac{p}{p(1+\lambda) + \gamma_1 + \gamma_2}, \\ \Phi_n = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}_1}; \end{array} \right.$$

$\mathcal{F}$ désignant la force magnétomotrice d'un pôle *bobiné*, Φ_n serait le flux normal que l'on obtiendrait dans une machine où chacun des $2p$ pôles porterait la force magnétomotrice $\mathcal{F}$.

» Les formules (11) deviennent :

$$(20) \quad (3) \quad \left\{ \begin{array}{l} F = B\mathcal{F}, \\ \frac{\mathcal{P}_1}{\Phi_n} = -\gamma_1 B, \\ \frac{\mathcal{P}_2}{\Phi_n} = -\gamma_2 B, \\ \frac{\Phi_1}{\Phi_n} = 1 - B, \\ \frac{\Phi_2}{\Phi_n} = -\lambda B; \end{array} \right.$$

(1) Il ne s'agit donc pas ici des machines des types Manchester et Thury, dénommées aussi parfois à *pôles conséquents*.

(2) Il n'est donc pas recommandable d'employer les pôles conséquents dans les dynamos puissantes et à vitesse angulaire élevée, comme les turbodynamos et les gros moteurs de traction.

(3) Nous négligeons ici toutes fuites pour simplifier.

et la formule (14) donne toujours la valeur des forces électromotrices induites.

» Pour le cas extrême où

$$\rho_1 = \rho_2 = 0,$$

on a ,

$$B = 0,$$

$$\Phi_1 = \Phi_n,$$

$$\Phi_2 = 0,$$

c'est-à-dire qu'il ne passe aucun flux dans les pôles conséquents, qui sont alors complètement shuntés par les coussinets et les paliers.

» Pour l'autre cas extrême, où

$$\rho_1 = \infty,$$

$$\rho_2 = \infty,$$

on a

$$B = \frac{1}{1 + \lambda},$$

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_n} = \frac{(-\Phi_2)}{\Phi_n} = \frac{\lambda}{1 + \lambda},$$

et si $\lambda = 1$,

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_n} = \frac{(-\Phi_2)}{\Phi_n} = \frac{1}{2},$$

résultat bien compréhensible, les flux des pôles bobinés se fermant alors uniquement par les pôles conséquents.

» Dans les cas intermédiaires, les équations (20) nous donnent :

$$(21) \quad p\Phi_1 = -(\psi_1 + \psi_2 + p\Phi_2),$$

ce qui montre explicitement la fermeture des flux des pôles bobinés à travers les circuits en parallèle constitués par les pôles conséquents et les circuits de coussinets.

» *Valeur de la force électromotrice d'induit.* — Il y a lieu de faire une remarque en ce qui concerne la valeur de la force électromotrice induite dans l'enroulement induit d'une machine à pôles conséquents :

» Les flux Φ_1 et Φ_2 issus de deux pôles consécutifs sont inégaux ; il est facile de voir que le flux dérivé dans l'arbre est égal à la différence des valeurs absolues des flux Φ_1 et Φ_2 est inactif dans le cas de l'anneau

et actif dans le cas du tambour; par suite, dans l'expression

$$e = N\omega\Phi \cdot 10^{-8} \quad (\text{enroulement parallèle}),$$

ou

$$e = pN\omega\Phi \cdot 10^{-8} \quad (\text{enroulement en série}),$$

de la force électromotrice il y a lieu de prendre pour Φ la valeur Φ_2 pour l'induit en anneau et la moyenne des valeurs absolues $\frac{\Phi_1 + \Phi_2}{2}$ pour l'induit en tambour (').

» *Exemples de répartition du flux.* — La figure 3 donne la répar-

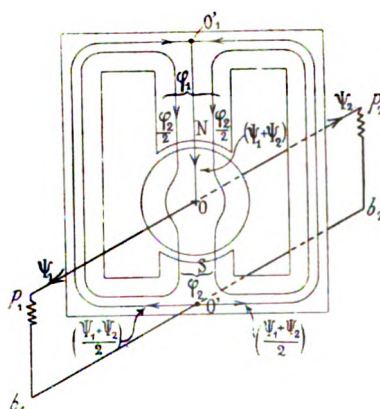


Fig. 3.

tition des flux dans une machine bipolaire dans laquelle le pôle N est seul bobiné :

» Partant de la culasse inductrice aux environs de O_1 et se dirigeant vers le centre O de l'induit, on voit que le flux ϕ_1 du pôle bobiné traverse l'entrefer correspondant et se divise en deux parties : l'une ϕ_2 traverse l'entrefer et la masse polaire non bobinée de l'autre pôle S pour aboutir de nouveau à la culasse en O_1 ; l'autre partie, égale à $(\psi_1 + \psi_2)$, va de O en O_1 en utilisant les deux éléments arbre-palier-

(¹) Dans un induit en anneau ordinaire, les conducteurs actifs rencontrés en partant d'une ligne de balais pour aboutir à la ligne voisine distante d'un pôle sont compris dans une zone égale à un seul intervalle interpolaire; dans un tambour multiple, au contraire, ces conducteurs intéressent une zone égale à deux intervalles interpolaires. Et tandis que pour l'induit en anneau le flux dérivé dans l'arbre traverse deux fois l'enroulement induit avec actions contraires, pour l'enroulement tambour, au contraire, ce flux ne traverse qu'une seule fois l'enroulement et est par suite actif.

bâti, l'élément Op_1b_1O' conduisant le flux ψ_1 et l'élément Op_2b_2O' le flux ψ_2 . De O' , les flux φ_2 et $(\psi_1 + \psi_2)$ réunis se divisent en deux parties égales pour rejoindre O'_1 .

» La figure 4 donne la répartition des flux pour une machine tétra-

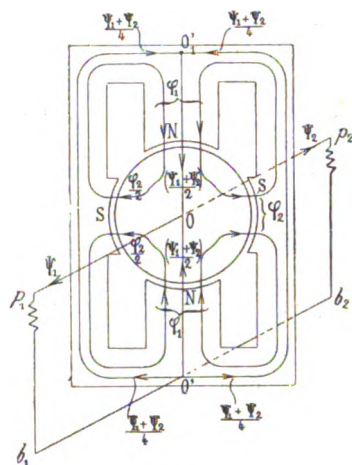


Fig. 4.

polaire dans laquelle les deux pôles verticaux N de même nom sont seuls bobinés :

» De chacun des points O' et O'_1 part vers le centre O un flux φ_1 qui traverse un pôle bobiné et l'entrefer correspondant; de chaque flux φ_1 , deux portions égales chacune à $\frac{\varphi_1}{2}$ vont alimenter respectivement une moitié de chacun des pôles non bobinés S adjacents, et les deux résidus $\varphi_1 - \varphi_2$ viennent se réunir en O pour se diviser entre les deux éléments arbre-palier-bâti, savoir l'élément Op_1b_1O' qui conduit le flux ψ_1 et l'élément Op_2b_2O' qui conduit le flux ψ_2 et

$$\psi_1 + \psi_2 = 2(\varphi_1 - \varphi_2).$$

» En O' , une moitié $\left(\frac{\psi_1 + \psi_2}{2}\right)$ du flux d'arbre reprend le trajet $O'O$ déjà connu, et l'autre moitié se divise en deux parties égales chacune à $\frac{\psi_1 + \psi_2}{4}$ et qui viennent se réunir à nouveau en O'_1 .

» Valeurs relevées sur un moteur G. E. 800. — Comme exemple de moteur de traction à pôles conséquents, nous citerons le type bien

connu G. E. 800, dont les caractéristiques au régime d'une heure sont 500 volts, 50 ampères, 425 t : min; dans un essai sous tension réduite, pour une vitesse angulaire de 232 t : min. et une excitation de 32 ampères, on a relevé entre le centre de l'arbre et sa périphérie près du collecteur une différence de potentiel de 0,013 volt, ce qui correspond à un flux

$$\psi_1 = 337\,000$$

et à une induction dans l'arbre à l'entrée interne du coussinet ($d_1 = 6,345$ cm)

$$B_1 = 10\,720.$$

» *Moteurs à pôles alternativement shunt et série.* — Le cas des moteurs à pôles alternativement shunt et série ⁽¹⁾ se traite aisément à l'aide des formules générales; nous n'y insisterons pas, faisant simplement remarquer qu'il y a flux dans l'arbre d'un tel moteur lorsque les ampèretours des deux espèces de pôles ont des valeurs différentes.

» *Commutation avec flux dans l'arbre.* — Dans les machines à pôles conséquents, la répartition à la périphérie de l'induit de l'induction due aux bobinages inducteurs ne se répète pas identiquement avec changement de signe lorsqu'on passe du milieu d'un intervalle interpolaire au milieu suivant. Il résulte de ceci que, pour un induit en anneau, deux lignes de balais consécutives ne seraient pas dans les mêmes conditions de commutation. Mais cet effet est à peu près sans action dans le cas d'un induit en tambour à pas diamétral, puisque la distribution de l'induction due au système inducteur est symétrique par rapport à l'axe d'un pôle bobiné; si donc l'un des côtés d'une section en commutation est soumise à une majoration d'induction périphérique, l'autre côté de cette section est soumis à la même majoration agissant en sens inverse dans la section entière par suite de la façon dont est effectuée la réunion en série par opposition des deux côtés de la section. Néanmoins, cette compensation n'est strictement rigoureuse qu'au moment où la section est coaxiale avec l'axe d'un pôle.

» *Les machines dans lesquelles les connexions à forte intensité*

⁽¹⁾ Les petits moteurs destinés aux appareils de levage et de manutention présentent fréquemment cette disposition.

constituent des spires entourant l'arbre ⁽¹⁾ *présentent quelque chose de semblable* : l'action de ces spires donne à la périphérie de l'induit une modification de l'induction qui est toujours de même signe; ceci est donc défavorable dans le cas d'un anneau et ne l'est pas dans le cas du tambour à pas diamétral.

» Si la machine est munie de pôles supplémentaires, le flux dans ceux de ces pôles ayant une certaine polarité sera augmenté et le flux dans les pôles supplémentaires de l'autre polarité sera affaibli; les questions de saturation seules pourront empêcher cette *augmentation* et cet *affaiblissement* d'être *égaux*, et c'est seulement l'inégalité de ces deux actions qui pourrait influencer sur la commutation dans le cas du tambour à pas diamétral. Il est facile de démontrer l'égalité de l'augmentation et de l'affaiblissement des pôles supplémentaires de polarités contraires, lorsqu'on fait abstraction de la saturation en supposant toutes les réluctances constantes.

» Considérons une machine à pôles supplémentaires dans laquelle les forces magnétomotrices et les réluctances des pôles principaux et supplémentaires sont correctes; on a donc

$$\begin{aligned}\sum \mathcal{F} &= 0, & \sum f &= 0, \\ \sum \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} &= 0, & \sum \frac{f}{r} &= 0;\end{aligned}$$

mais soient f'_1 et f'_2 les forces magnétomotrices dues aux connexions incorrectes à forte intensité entourant l'arbre de part et d'autre de la carcasse; les formules générales précédentes deviennent

$$(22) \quad F = \frac{\frac{f'_1}{\rho_1} + \frac{f'_2}{\rho_2}}{\frac{2p}{\mathcal{R}} + \frac{2p}{r} + \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}},$$

or, les flux φ_1 et φ_2 dans les pôles supplémentaires de chaque polarité sont

$$(23) \quad \begin{cases} \varphi_1 = -\frac{1}{r}(F - f), \\ \varphi_2 = -\frac{1}{r}(F + f); \end{cases}$$

⁽¹⁾ Voir *Bulletin*, février 1915.

or, la somme des inductions périphériques agissant sur les deux côtés actifs d'une bobine tambour multiple en commutation est proportionnelle à

$$(24) \quad \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2f}{r};$$

cette valeur est bien indépendante de F et est la même que pour la machine normale, sans connexions incorrectes.

» *Remarque générale relative à la suppression des courants produits dans l'arbre fonctionnant en disque de Faraday.* — Toutes les fois qu'il y a production de flux dans un arbre, que celle-ci soit due à des connexions incorrectes à forte intensité entourant l'arbre, ou qu'elle soit due à des inégalités de pôles, l'isolement des paliers du socle ne constitue pas un remède complet, puisque l'on peut avoir des courants se fermant en allant d'un point à un autre d'un même coussinet.

» Le remède complet consiste à éviter les causes : connexions incorrectes, inégalités de bobinage ou de centrage, pôles conséquents.

» *Extension aux moteurs d'induction.* — On peut souvent mesurer le glissement d'un moteur d'induction, tout au moins celui des moteurs à cage d'écureuil, en reliant un voltmètre sensible à aimant (un ampèremètre continu de 0,1 volt par exemple) à deux frotteurs que l'on appuie aux centres des deux extrémités de l'arbre. On obtient plus de sensibilité et de précision en prenant la tension entre le centre de l'arbre et sa périphérie en dedans d'un palier (1), ou entre cette périphérie et la masse de la carcasse du stator, ou encore en reliant le voltmètre aux deux extrémités d'un bobinage composé d'un certain nombre de spires entourant le moignon intérieur d'un palier ou l'un des bras d'un palier.

» Nous indiquerons quelques résultats (2) obtenus sur un moteur d'induction triphasé à cage d'écureuil de 18 chevaux, 20 ampères, 550 volts, fréquence 25, 6 pôles, de la G. E. Co (3).

(1) Périphérie de la section A' (fig. 6). — L'arbre fonctionne alors en disque de Faraday à flux alternatif. (Voir la Note suivant cette Communication.)

(2) Essais faits avec M. Haouy.

(3) Moteur G. E. Co, type I. 6. 18 A. 500, forme K, n° 161356.

» On avait entouré 10 spires sur chacun des deux moignons intérieurs des paliers. En mettant ces deux enroulements en série ou en opposition par rapport à l'arbre considéré seul, on a constaté que les flux dans les deux éléments arbre-palier-bâti *se tournent le dos* à partir du noyau d'induit. Il semble bien qu'il y a ici un effet analogue à celui de pôles conséquents, ou plutôt de pôles inégaux, dans la cage d'écureuil, cet effet pouvant résulter par exemple de différences dans les résistances des éléments de la cage.

» Des relevés oscillographiques des tensions aux bornes des enroulements entourant le moignon intérieur d'un palier montrent que l'arbre est traversé par un flux alternatif longitudinal ayant la fréquence du glissement et par un très léger flux à la fréquence 25 d'alimentation du stator; ce léger flux à fréquence 25 s'explique très bien par une dissymétrie quelconque des pôles du stator.

» L'arbre se comporte comme un disque de Faraday à flux alternatif; la tension relevée par frotteurs entre son centre et le point *m'* (*fig. 6*) de sa périphérie en dedans d'un palier est donnée par la formule

$$(25) \quad e = - \frac{n}{60} \Phi \sin g \omega t \quad (1),$$

où n désigne le nombre de tours par minute de l'arbre, et $g\omega$ la pulsation du glissement.

» Pour une tension aux bornes du stator de 550 volts et un courant de 22 ampères, on avait un glissement $g = 0,0452$ et une valeur maxima $u_{\max}$ de la tension *statique* aux bornes des 20 spires des deux paliers égale à 0,075 volt, soit une tension maxima moyenne de 0,00375 volt par spire. Le flux maxima correspondant est

$$\Phi_{\max} = \frac{u_{\max} \cdot 10^8}{g\omega} = 53\,000 \text{ maxwells},$$

et si l'on admet que tout le flux passe à l'intérieur de l'arbre, dont le diamètre est de 8,4 cm en dedans du palier, l'induction maxima moyenne dans celui-ci serait

$$(\psi_{\max})_{\text{moy}} = 960 \text{ maxwells}.$$

(1) Voir Note ci-après.

NOTE.

ARBRE FONCTIONNANT EN DISQUE DE FARADAY A FLUX ALTERNATIF.

» *a. Section droite d'arbre au repos.* — Considérons (*fig. 5*) une section droite d'un arbre au repos; cette section est traversée par un

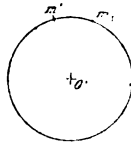


Fig. 5.

flux alternatif $\Phi \sin \omega t$ et nous admettons que la distribution de ce flux est de révolution autour de l'axe de l'arbre. Ce flux est ainsi distribué normalement à une série de cercles concentriques, chacun de ces cercles étant à un instant donné un cercle d'égale induction.

» La force électromotrice induite le long d'un quelconque de ces cercles est la dérivée changée de signe du flux intérieur à ce cercle et les chutes de tension dues au courant qui en résulte *équilibrent* la force électromotrice pour chaque élément de longueur du cercle. Il en est ainsi pour tous les cercles concentriques de la section de l'arbre et en particulier pour la périphérie de celui-ci, de telle sorte que la différence de potentiel entre deux points quelconques m' , m_1 d'un cercle périphérique est nulle.

» La force électromotrice statique induite le long de la périphérie et ainsi équilibrée a pour valeur

$$(26) \quad e_s = -\omega \Phi \cos \omega t \quad (1);$$

si l'on désigne par R le rayon de la section considérée de l'arbre, la portion de cette force électromotrice équilibrée correspondant à l'arc $m'm_1$ est

$$(27) \quad e_{m'm_1} = -\left(\frac{\text{arc } m'm_1}{2\pi R}\right) \omega \Phi \cos \omega t.$$

» Ces forces électromotrices statiques sont aussi bien équilibrées

(1) Cette force électromotrice statique est mesurable aux bornes d'une spire entourant l'arbre.

lorsque l'arbre tourne que lorsqu'il est au repos, à la condition que la distribution électromagnétique à l'intérieur de l'arbre demeure symétrique par rapport à l'axe de celui-ci.

» Puisque la différence de potentiel entre les deux points m' , m'_1 est nulle, *il semble* qu'un voltmètre à débit négligeable branché entre ces deux points ne doit donner aucune indication, ce qui n'est pas. Ce voltmètre V indiquera une tension justement égale à $e_{m'm'_1}$ dont la valeur est donnée par la formule (27) :

» En effet, *si le petit circuit $m'Vm'_1m'$ n'est traversé par aucun flux*, la force électromotrice induite dans le *grand* circuit $m'Vm'_1m'$ est la même que celle induite dans le cercle périphérique; il en résulte, par différence, que la force électromotrice induite dans le conducteur externe $m'Vm'_1$ est égale à celle induite dans l'arc circulaire $m'm'_1$ et donnée par (27). Et comme tous les points de la section de l'arbre sont équipotentiels électriques, le voltmètre indiquera la force électromotrice $e_{m'm'_1}$ (¹).

» *b. Extrémité d'arbre au repos.* — Considérons maintenant l'extrémité OO' d'un arbre au repos traversant le coussinet C (*fig. 6*). Nous appliquons un frotteur B au centre O de la section extrême A et un autre frotteur *b* en *a* à la périphérie de la section A' située en dedans du moteur au delà du coussinet; nous relions ces deux frotteurs par des conducteurs aux deux bornes d'un électromètre ou d'un voltmètre V très résistant, de consommation négligeable.

» La section A' est traversée par le flux $\Phi \sin \omega t$. Le palier C est symétrique par rapport au plan diamétral vertical Omm'O'; nous admettons que les lignes de force venant de la section A' suivent l'arbre et viennent aboutir à l'entrefer du coussinet de telle façon que la trajectoire d'une quelconque de ces lignes, sensiblement parallèle à l'axe d'abord, puis radiale, soit toujours contenue dans un plan diamétral de l'arbre. Pour chaque section droite de l'arbre à l'intérieur du coussinet, l'induction de ces lignes dans l'entrefer coussinet-

(¹) Un cas identique au cas actuel est celui d'une spire secondaire de transformateur en court circuit; si la spire et le noyau du transformateur sont de révolution, un voltmètre branché entre les deux extrémités d'un arc pris sur la spire indiquera la tension induite dans cet arc, alors que les deux extrémités considérées sont au même potentiel; ceci suppose toujours que le circuit fermé constitué par l'arc de spire et l'élément contenant le voltmètre n'est traversé par aucun flux.

» *Il semble* donc que le voltmètre V n'indiquera aucune tension.

» Mais il est facile de voir, au contraire, d'après ce que nous avons montré pour une section de l'arbre, que *le voltmètre V indiquera la tension $e_{m'a}$* égale à la portion de tension périphérique induite dans l'arc $m'a$ du fait du flux alternatif traversant la section A' : en effet, le circuit de voltmètre $m'm$ OBVba branché aux bornes de l'élément $m'a$ indique une tension égale à celle induite dans cet élément

$$(28) \quad e_{m'a} = e_s \frac{\text{arc } m'a}{2\pi R},$$

d'après ce que nous avons vu en α , et c'est la seule force électromotrice agissant sur le voltmètre V.

» Nous pouvons encore chercher la valeur de cette force électromotrice en décomposant le circuit OBVbaO'O en deux autres éléments, savoir :

» 1° *bis*. Le circuit $Om_1m'_1O'O$ (1) qui étant diamétral n'est traversé par aucun flux ;

» 2° *bis*. Le circuit OBVbam'm, O, lequel est traversé par un flux sortant de la surface d'entrefer de coussinet $mm'm'_1m, m$; la portion de la force électromotrice statique périphérique suivant am'_1 est compensée.

» Si l'on omettait de tenir compte de la force électromotrice induite dans l'élément de circuit $m'_1m, OBVba$, *il semblerait* que la décomposition II conduit à un résultat différent de celui donné par la décomposition I, puisqu'il y a flux embrassé dans le cas de II, tandis qu'il n'y en a pas dans le cas de I.

» Mais il est facile de voir qu'on arrive au même résultat en en tenant compte : en effet, dans la décomposition II, le flux sortant de la surface d'entrefer de coussinet $mm'm'_1m, m$ est égal au flux entrant par le secteur $O'm'm'_1$ et la force électromotrice qui en résulte est égale à celle induite dans l'arc $m'm'_1$; il faut y joindre la force électromotrice induite dans l'élément $m'_1m, OBVba$, laquelle est égale à la force électromotrice dans l'arc m'_1a ; la somme de ces deux forces

(1) Nous prenons ici le plan diamétral $Om_1m'_1O'$ qui fait un certain angle avec le plan vertical.

électromotrices est bien égale à la force électromotrice induite dans l'arc $m'a$ et est donnée par la formule (28).

» Dans tous les cas, *la force électromotrice mesurée par le volt-mètre est égale à la force électromotrice induite dans l'arc périphérique $m'a$ compris entre la raie mm' de séparation des lignes de forces dans le coussinet et le frotteur a .*

» *c. Arbre tournant.* — Mettons en rotation l'arbre de la figure 6; considérons le circuit fermé déformable constitué à l'instant t par la branche extérieure $OBVba$ supposée indéformable, par la portion périphérique aa_1 , par un rayon quelconque a_1O' de la section A' et par la portion $O'O$ de l'axe; le flux dans la section A' à cet instant est $\Phi \sin \omega t$.

» Je prends comme origine du temps le dernier moment (précédant le temps t actuel) pour lequel on a eu $\Phi \sin \omega t = 0$, cette valeur étant ensuite suivie de valeurs positives de $\sin \omega t$. Dans ces conditions, depuis ce moment $t = 0$, le rayon actuellement en Oa_1 a eu le temps, pour parvenir en cette position, de décrire un nombre de tours égal à $\frac{n}{60}t$ ⁽¹⁾, de telle sorte que le flux φ embrassé par le circuit déformable au temps t est

$$(29) \quad \varphi = \frac{n}{60}t\Phi \sin \omega t,$$

et la force électromotrice induite correspondante est

$$(30) \quad e = -\frac{d\varphi}{dt} = -\left[\frac{n}{60}\Phi \sin \omega t + \left(\frac{n}{60}t\right)\omega\Phi \cos \omega t \right].$$

» Dans cette expression de la force électromotrice induite, nous remarquons que le second terme représente, au facteur constant $\left(\frac{n}{60}t\right)$ près, la force électromotrice statique induite lorsque l'arbre est au repos [formule (26)]; et le facteur constant $\left(\frac{n}{60}t\right)$ représente justement le nombre de tours décrits par un point de la périphérie de l'arbre, le point actuel a , par exemple, pendant le temps t . Le second terme de la parenthèse représente donc la portion de force électromotrice périphérique induite statiquement correspondant au chemin parcouru pendant

(1) n désignant le nombre de tours par minute de l'arbre.

le temps t par le frotteur ba à la périphérie de la section A' ; ce terme serait observé avec cette valeur si un conducteur filiforme isolé sortait du balai b et s'enroulait sur l'arbre au fur et à mesure de sa rotation. Dans le cas actuel, d'après ce que nous avons vu pour l'arbre en repos, une telle force électromotrice est équilibrée à chaque instant et pour tous les éléments de longueur par les chutes de tension, dues au courant qui en résulte. Par contre, nous devons ajouter l'expression (28), pour tenir compte de la force électromotrice induite extérieurement et la formule (30) est remplacée par la suivante :

$$(31) \quad e = - \left[\frac{n}{60} \Phi \sin \omega t + \left(\frac{\text{arc } m' a}{2 \pi R} \right) \omega \Phi \cos \omega t \right].$$

» Si le frotteur b frotte en m' , sur la raie de séparation des lignes de force, la force électromotrice e observée dans le circuit extérieur et qui sera alors purement *dynamique* se réduit à

$$(32) \quad e_d = - \frac{n}{60} \Phi \sin \omega t.$$

» Cette expression est tout à fait identique à celle trouvée dans le cas d'un arbre fonctionnant en disque de Faraday avec flux continu ⁽¹⁾ et pourrait se calculer de la même façon en considérant le déplacement infiniment petit de Oa , en Oa' , et en supposant le flux $\Phi \sin \omega t$ constant pendant le temps dt correspondant.

» *Remarque.* — Le rapport des valeurs efficaces $(e_s)_{\text{eff}}$ et $(e_d)_{\text{eff}}$ des forces électromotrices purement statique et purement dynamique se déduit des équations (26) et (32) :

$$(33) \quad \frac{(e_s)_{\text{eff}}}{(e_d)_{\text{eff}}} = \frac{\omega}{\frac{n}{60}};$$

lorsqu'on envisage le glissement d'un moteur d'induction, ω doit être remplacé en (33) par $g\omega$. »

M. le PRÉSIDENT remercie M. Girault des intéressantes considérations qu'il vient d'exposer.

La séance est levée à 17 h 45 m.

(1) *Bulletin* de février 1915, p. 49.

RÉSUMÉS DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES.

Déformation des ondes d'un courant alternatif, par suite d'une variation cyclique de résistance, par F. BEDELL et E.-C. MAYER (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, février 1915).

Lorsque la résistance d'un circuit non inductif varie avec l'intensité et avec la température, la courbe ondulatoire de l'intensité diffère de celle de la force électromotrice imprimée; un troisième harmonique intervient, qui aplanit l'onde lorsque le coefficient de température est positif, et la relève en pointe lorsque ce coefficient est négatif. S'il n'y a pas retard de température dans la résistance, la valeur maximum de la résistance concorde avec le maximum d'intensité, et le sommet du troisième harmonique coïncide avec le sommet de l'harmonique fondamental. Un retard de température détermine un déphasage relatif entre les deux ondes, et l'harmonique fondamental n'est pas plus longtemps en phase que la force électromotrice imprimée. Un certain nombre de courbes d'ondes théoriques sont présentées et discutées dans le Mémoire.

ERRATA.

Dans le Mémoire de M. Henri Besson sur *Les installations électromécaniques des mines de fer d'Ingouletz (Russie méridionale)* publié dans le n° 43 du *Bulletin* :

Page 290, dans la carte de la région d'Ingouletz, figure 1, en haut à droite, *au lieu de* Lozouria, *lire* Lozowaia.

Même page, 4^e ligne au-dessous de la carte, *au lieu de* kWA, *lire* kVA.

Page 292, 21^e ligne, 10^e mot, *au lieu de* facile, *lire* faciles.

Page 302, 5^e ligne au-dessous de la figure 8. *au lieu de* 0,84, *lire* 0,084 kg abs.

Page 304, figure 10, inscrire la lettre E pour désigner l'axe du levier distributeur, dont l'autre extrémité porte la lettre O.

Page 305, 20^e ligne, ajouter la lettre D (autour du point fixe D).

Même page, 30^e ligne, 2^e mot, *au lieu de* N', *lire* N".

Page 309, 6^e ligne, *au lieu de* les chéma, *lire* le schéma.

Page 313, 8^e ligne, *au lieu de* 50 pour 100, *lire* $\frac{1}{30}$.

Page 314, dernière ligne, *au lieu de* 280 volts, *lire* 220 volts.

IL Y A TRENTÉ ANS.

Novembre 1885. — Machine à influence du type de M. Wimshurst, par M. HILLAIRET.

— Appareils d'éclairage électrique pour les observations microscopiques, par M. G. TROUVÉ.

— Applications de l'électricité à la prévision du temps, par M. le D^r MARIÉ-DAVY.

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ INTERNATIONALE
DES
ÉLECTRICIENS.

SOMMAIRE.

SOMMAIRE : Compte rendu de la réunion mensuelle du 2 décembre 1915: Membres décédés: tués à l'ennemi, p. 353. — Récompenses honorifiques au titre de guerre, p. 354. — La perméabilité du fer aux fréquences élevées (M. R. Jouaust), p. 355; observations (M. E. Brylinski), p. 370. — Les oscillations à amortissement complexe (MM. A. Blondel et F. Carbenay), p. 379.

RESUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES, p. 394.

IL Y A 30 ANS, p. 396.

TABLE ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES, p. 397.

TABLE ALPHABÉTIQUE DES AUTEURS, p. 401.

COMPTE RENDU

DE LA

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du jeudi 2 décembre 1915 ⁽¹⁾.

PRÉSIDENCE DE M. BRYLINSKI.

La séance est ouverte à 17^h5^m.

Le procès-verbal de la dernière réunion mensuelle est adopté.

M. le Président fait part du décès de MM. *Brénot* (Maxime) et

(1) La Société n'est pas solidaire des questions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

Journée (Marcel); il en exprime ses vifs regrets et adresse ses profondes condoléances aux familles des Sociétaires suivants victimes de la guerre :

M. *Javal* (Jean), ingénieur électricien, député de l'Yonne ;

M. *Patot* (Henri), lieutenant au 22^e régiment d'infanterie, décédé le 24 octobre ;

M. *Toulon* (André), lieutenant au 9^e régiment du génie, mortellement frappé d'une balle en pleine poitrine, en montant à l'assaut à la tête de son peloton le 27 septembre, décoré de la croix de guerre et deux fois cité à l'ordre du jour.

D'autre part, M. le Président se fait un plaisir d'annoncer à la Société la nomination de chevaliers dans l'Ordre de la Légion d'honneur de deux de nos collègues mobilisés :

M. *CLAUDE* (Georges), lieutenant de réserve au service aéronautique d'une armée :

« Joint aux qualités remarquables de l'homme de science une activité, une énergie et un courage hors de pair. N'a cessé de se dépenser sans compter tant pour la fabrication des projectiles que pour leur lancement, participant lui-même à toutes les opérations de bombardement sur l'ennemi et donnant à tous le meilleur exemple de dévouement et de sang-froid. »

M. *NUGUES* (Léon-Auguste-Marie), capitaine au 1^{er} régiment d'artillerie à pied :

« Chargé de fonctions spéciales, dont l'extension était devenue nécessaire, a fait preuve de la plus grande activité et de qualité d'organisateur et d'administrateur tout à fait exceptionnelles : a assuré son service dans des conditions parfaites de rapidité et de bonne exécution malgré les difficultés d'un bombardement qui a nécessité le déplacement des ateliers (croix de guerre). »

L'ordre du jour appelle les Communications techniques.

LA PERMÉABILITÉ DU FER AUX FRÉQUENCES ÉLEVÉES (1).

M. R. JOUAUST. — « Lorsque le fer est soumis à une aimantation alternative rapide, les courants de Foucault qui se produisent dans sa masse ont pour effet de localiser le flux à la périphérie; il en résulte une diminution apparente de la perméabilité.

» Nous désignerons par *perméabilité apparente* le quotient de la valeur maxima du flux d'induction par la valeur maxima qu'aurait le flux de champ s'il n'y avait pas de courants induits.

» J.-J. Thomson a donné des formules qui permettent de calculer, connaissant la perméabilité vraie, l'action des courants de Foucault dans une tôle mince, c'est-à-dire la perméabilité apparente.

» En 1911, j'ai trouvé à la fréquence de 150000 périodes par seconde, pour des tôles de 0,05 cm d'épaisseur, une perméabilité apparente de 15, ce qui, d'après les formules de J.-J. Thomson, correspondrait à une perméabilité vraie de 150, alors qu'en continu pour le même champ magnétisant la perméabilité était de l'ordre de 2000.

» J'ai repris récemment des expériences de même genre, dans des conditions permettant encore plus de précision que dans les expériences de 1911. Le mode opératoire était sensiblement le même, mais au lieu d'exciter par dérivation le circuit secondaire que parcourait le courant magnétisant utilisé dans la mesure, on l'excitait par induction.

» Dans ces conditions, on ne trouvait dans ce circuit aucune trace d'harmonique supérieure.

» La fréquence du courant utilisé n'était dans ces expériences que de 40000 périodes par seconde.

» J'ai trouvé, pour des tôles au silicium de 0,045 cm d'épaisseur, une perméabilité apparente de 100, ce qui correspondait à une perméabilité vraie de 400.

» La perméabilité en courant continu pour les champs utilisés était d'environ 2500 (2).

(1) Cette Communication a été présentée en séance par M. P. JANET.

(2) Comme je l'ai montré dans mon précédent travail, quoique les formules de

» On pourrait expliquer ces résultats en disant que la perméabilité vraie des métaux magnétiques est plus faible pour les fréquences élevées que pour les basses fréquences.

» Une semblable hypothèse n'a rien d'absurde, puisque, lors de la découverte des oscillations électriques, on s'était demandé si elles étaient susceptibles d'aimanter les métaux et que de nombreux physiiciens, Pellat, Bjerknes, Perot avaient fait des expériences à ce sujet, expériences qui avaient mis en évidence la possibilité pour le fer de s'aimanter, même sous l'influence des oscillations électriques.

» Mais cette réduction énorme de la perméabilité de 2000 à 200 environ semble peu d'accord avec les idées que nous nous faisons à l'heure actuelle des phénomènes de l'aimantation.

» Les fréquences auxquelles nous donnons le nom de *fréquences élevées* (de l'ordre de 100000 périodes par seconde) sont en réalité excessivement petites par rapport à la fréquence des mouvements qui se produisent dans les métaux (nombre de chocs des électrons libres et vibrations propres des électrons liés).

» Cette remarque, en particulier, permet de répondre à l'objection suivante : la valeur de la résistivité à introduire dans les formules de J.-J. Thomson dans le cas qui nous occupe est-elle bien celle qu'on mesure à basse fréquence. Il est évident que, pour que la fréquence d'un courant eût une influence sur la résistivité du métal, il faudrait qu'elle fût du même ordre de grandeur que le nombre des chocs que reçoit un électron par seconde, nombre infiniment plus grand que le nombre de périodes par unité de temps des courants utilisés en télégraphie sans fil.

» On ne voit pas de même pourquoi, étant donnée la grande fréquence des oscillateurs dans les métaux, le plan dans lequel ils décrivent leur orbite ne pourrait pas subir avec la même facilité des mouvements oscillatoires de 40 périodes ou de 40 000 périodes par seconde.

» Du reste, un fait expérimental vient également montrer que les conclusions que l'on tire des formules de J.-J. Thomson sont inexactes

Thomson soient établies dans le cas d'une perméabilité constante et que, dans le fer, elle soit variable, on voit que la perméabilité à introduire ne doit être que de très peu inférieure à la perméabilité à la périphérie (*Bulletin de la Société des Électriciens*, janvier 1911).

et que la perméabilité vraie peut être presque du même ordre de grandeur en haute fréquence qu'en courant continu.

» J'ai pu étudier, avec le dispositif indiqué plus haut, des tôles ayant une épaisseur de 0,003 cm. Ces tôles, à la fréquence 40 000, avaient une perméabilité *apparente* de 1700. On voit qu'on est bien au-dessus de la perméabilité *vraie* de 400 trouvée dans les mêmes conditions pour les tôles au silicium de 0,045 cm.

» Des résultats du même genre ont été obtenus par Alexanderson.

» Il faut donc conclure de ces résultats expérimentaux que les formules classiques de Thomson ne s'appliquent pas et que la réduction de la perméabilité sous l'action des courants induits est beaucoup plus considérable que ces formules ne l'indiquent. Remarquons qu'il semble que, même dans le cas des tôles très minces pour lesquelles on trouve la perméabilité apparente de 1700, la réduction observée est encore plus considérable que la réduction calculée, en admettant que la perméabilité vraie à introduire dans les calculs est la perméabilité mesurée pour le même champ magnétisant en courant continu.

» Cette perméabilité est de 2500 environ et, dans ces conditions, la perméabilité apparente devrait être de 2200.

» Mais il est une autre grandeur pour laquelle se manifeste plus nettement encore le désaccord entre la théorie et l'expérience : c'est le décalage entre le courant dans l'enroulement magnétisant et la force électromotrice induite.

» J'ai indiqué dans une précédente Communication le mode opératoire que j'ai suivi pour mesurer cet angle.

» M. Boucherot a montré que pour des tôles, lorsque l'épaisseur de l'éprouvette était suffisamment grande ou la fréquence suffisamment élevée, ce décalage, qui est de 90° pour les basses fréquences, atteint 45°.

» Or, pratiquement, nous trouvons des décalages de 30° dans le cas des tôles de 0,04 cm d'épaisseur à la fréquence 40 000, soit une différence de 15°. Pour les tôles de 0,003 cm cet angle est de 43°, alors que pour des tôles aussi minces il devrait être de 66°. On voit que, dans ce cas, l'écart entre le décalage observé et le décalage calculé atteint 23°.

» La considération de ce décalage est particulièrement intéressante.

» Il est toujours assez délicat de déduire la perméabilité vraie de la perméabilité apparente.

» Il faut connaître exactement l'épaisseur des tôles, la fréquence, la résistivité.

» Or, cette dernière grandeur est assez mal connue. Nous avons répondu plus haut à certaines objections que l'on pouvait faire relativement à la constance de cette résistivité.

» Mais notre raisonnement n'est valable que pour les métaux purs. Pour ce qui est des alliages, il y a quelques années Lord Rayleigh, d'une part, Liebenow, d'autre part, avaient cherché à expliquer les valeurs élevées de leur résistivité en faisant intervenir l'effet thermo-électrique au contact des divers constituants.

» Comme conséquence de cette théorie, la résistivité ne devait pas avoir la même valeur en courant continu et en courant alternatif. Les divers expérimentateurs qui se sont occupés de la question n'ont jamais pu mettre en évidence cette différence, mais toutes les expériences étaient faites avec des courants de basse fréquence, rien ne prouve que l'écart ne peut pas devenir appréciable aux fréquences élevées.

» Or, comme on le verra plus loin, cette valeur de 45° est une valeur limite qui ne devrait pas pouvoir être dépassée, et, d'autre part, les conditions expérimentales dans lesquelles nous nous trouvions avec les tôles épaisses étaient telles qu'elle devait être très sensiblement atteinte, alors même que la perméabilité, l'épaisseur et la résistivité n'auraient pas eu exactement les valeurs que nous leur attribuions.

» De plus, les formules que nous appliquons ont été établies dans le cas de plaques infiniment larges et infiniment longues. Nous les appliquons au cas d'un circuit fermé, qui revient au cas d'une plaque infiniment longue. Ces plaques étant très larges par rapport à leur épaisseur, on peut jusqu'à un certain point les regarder comme infiniment larges, mais cela n'est pas complètement exact.

» Le fait que le décalage limite entre l'induction et la force électromotrice réduite atteint 45° est au contraire un fait général. C'est aussi vrai pour un cylindre que pour une plaque et l'objection qu'on pourrait tirer de la forme de l'éprouvette, pour le calcul de la perméabilité vraie en fonction de la perméabilité apparente, tombe dans la considération du décalage.

» Il nous reste donc maintenant à chercher à expliquer ce désaccord entre la théorie et la pratique, et en particulier pourquoi le décalage entre l'induction et la force électromotrice induite a une valeur plus petite que la valeur théorique.

» Nous étudierons tout d'abord les lois de propagation d'une onde plane se déplaçant dans la direction de l'axe des x , le champ magnétique Z étant dirigé suivant l'axe des z et le champ électrique q suivant l'axe des y .

» Nous supposerons que le milieu dans lequel se déplace cette onde ait une conductivité σ , un pouvoir inducteur spécifique ε et une perméabilité μ . Nous supposerons d'abord qu'il ne présente pas d'hystérésis. Nous pouvons poser par exemple, pour une onde sinusoïdale de pulsation ω ,

$$Z = A e^{-\gamma x + i\omega t}.$$

Les équations de Maxwell deviennent

$$(1) \quad 4\pi\sigma \frac{\partial q}{\partial x} + \varepsilon \frac{\partial^2 q}{\partial x \partial t} = - \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}$$

et

$$- \mu \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial x}$$

ou

$$- \mu \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 q}{\partial x \partial t},$$

et, en substituant dans (1),

$$(2) \quad + 4\pi\sigma\mu \frac{\partial z}{\partial t} + \varepsilon\mu \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2};$$

or

$$\begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial x} &= -A\gamma e^{-\gamma x + i\omega t}, & \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} &= A\gamma^2 e^{-\gamma x + i\omega t}, \\ \frac{\partial z}{\partial t} &= +\omega i e^{\gamma x + i\omega t}, & \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} &= -\omega^2 A e^{-\gamma x + i\omega t}. \end{aligned}$$

L'équation devient

$$4\pi\sigma\mu\omega i - \varepsilon\mu\omega^2 = \gamma^2.$$

Posons $\gamma = \alpha + \beta i$, $\gamma^2 = \alpha^2 - \beta^2 + 2\alpha\beta i$, on a

$$\begin{aligned} 4\pi\sigma\mu\omega &= 2\alpha\beta, \\ \varepsilon\mu\omega^2 &= \beta^2 - \alpha^2. \end{aligned}$$

On en tire

$$\alpha^2 = \frac{\mu}{2} \left[-\varepsilon \omega^2 + \sqrt{\varepsilon^2 \omega^4 + 16 \pi^2 \sigma^2 \omega^2} \right],$$

$$\beta^2 = \frac{\mu}{2} \left[\varepsilon \omega^2 + \sqrt{\varepsilon^2 \omega^4 + 16 \pi^2 \sigma^2 \omega^2} \right].$$

L'équation de l'onde devient donc

$$Z = A e^{-\alpha x - i\beta x + i\omega t}.$$

» Ces formules sont du reste classiques (1). Elles ont pu nous permettre de calculer la répartition de l'induction dans une tôle mince infiniment large et infiniment longue, la direction du champ magnétique étant l'axe des z et l'épaisseur de la tôle comptée suivant l'axe des x .

» Le champ magnétisant est produit par exemple par un enroulement magnétisant entourant la tôle de façon que sur les deux faces externes de la tôle le champ magnétisant ait la même valeur $H_0 e^{i\omega t}$. Le champ magnétisant en un point peut être considéré comme la superposition de deux ondes planes partant simultanément au temps 0 du centre de la plaque pris pour origine des coordonnées et cheminant en sens inverse.

» Nous désignerons par $2a$ l'épaisseur de la plaque. Sur une des faces externes, on a donc

$$H_0 e^{i\omega t} = A [e^{-\alpha a - i\beta a} + e^{+\alpha a + i\beta a}] e^{i\omega t},$$

d'où

$$A = \frac{H_0}{e^{-\alpha a - i\beta a} + e^{+\alpha a + i\beta a}}.$$

En un point, la valeur du champ est donc

$$\frac{H_0}{e^{-\alpha a - i\beta a} + e^{+\alpha a + i\beta a}} e^{i\omega t} [e^{-\alpha x - i\beta x} + e^{+\alpha x + i\beta x}]$$

et la valeur du flux de champ à l'intérieur de la tôle est, par centimètre de largeur,

$$\int_{-a}^{+a} \frac{H_0 e^{i\omega t}}{e^{+\alpha a + i\beta a} + e^{-\alpha a - i\beta a}} (e^{+\alpha x + i\beta x} + e^{-\alpha x - i\beta x}) dx.$$

(1) Max ABRAHAM, *Die Lehre der Elektrodynamik*, t. I, p. 315.

» Cette intégrale se divise en deux parties :

$$\frac{H_0 e^{i\omega t}}{e^{\alpha a + i\beta a} + e^{-\alpha a - i\beta a}} \int_{-a}^{+a} e^{\alpha x + i\beta x} dx \quad \text{et} \quad H_0 e^{i\omega t} \int_{-a}^{+a} e^{-\alpha x - i\beta x} dx.$$

Or

$$\int e^{\alpha x + i\beta x} dx = \frac{e^{\alpha x + i\beta x}}{\alpha + i\beta} = \frac{e^{\alpha x + i\beta x - i\psi}}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}$$

en posant

$$\tan \psi = \frac{\beta}{\alpha}.$$

On a donc pour le flux de champ total

$$\left[\frac{H_0}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \frac{e^{\alpha x + i\beta x} - e^{-\alpha x - i\beta x}}{e^{\alpha a + i\beta a} + e^{-\alpha a - i\beta a}} \right]_{-a}^{+a} e^{i\omega t - i\psi}, \quad \frac{2 H_0}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \frac{e^{\alpha a + i\beta a} - e^{-\alpha a - i\beta a}}{e^{\alpha a + i\beta a} + e^{-\alpha a - i\beta a}} e^{i\omega t - i\psi},$$

ce qui peut s'écrire

$$\frac{2 H_0}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \operatorname{th}(\alpha a + i\beta a) e^{i\omega t - i\psi}.$$

Mais en vertu des propriétés des fonctions hyperboliques, on a

$$\operatorname{th} \alpha a + i\beta a = \frac{(\operatorname{ch} 2\alpha a - \cos 2\beta a)^{\frac{1}{2}}}{(\operatorname{ch} 2\alpha a + \cos 2\beta a)^{\frac{1}{2}}} e^{i\gamma}$$

avec

$$\tan \gamma = \frac{\sin 2\beta a}{\operatorname{sh} 2\alpha a};$$

ainsi le flux de champ, par centimètre de largeur, dans la tôle qui, sous l'action des courants induits, serait

$$2 \alpha H_0 e^{i\omega t},$$

est

$$\frac{2 H_0}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \left(\frac{\operatorname{ch} 2\alpha a - \cos 2\beta a}{\operatorname{ch} 2\alpha a + \cos 2\beta a} \right)^{\frac{1}{2}} e^{i\omega t - i\psi + i\gamma}.$$

» Puisque nous supposons constante la perméabilité, le flux d'induction dans la tôle en courant alternatif est

$$2 \mu \frac{H_0}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \left(\frac{\operatorname{ch} 2\alpha a - \cos 2\beta a}{\operatorname{ch} 2\alpha a + \cos 2\beta a} \right)^{\frac{1}{2}} e^{i\omega t - i\psi + i\gamma},$$

et par conséquent la perméabilité apparente est

$$(1) \quad \mu_{\text{app.}} = \frac{\mu}{\alpha \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \left(\frac{\operatorname{ch} 2\alpha a - \cos 2\beta a}{\operatorname{ch} 2\alpha a + \cos 2\beta a} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

» On voit en outre que le flux d'induction est en retard sur le champ magnétisant à la périphérie de la tôle d'un angle $\psi - \chi$ et que, par conséquent, le décalage entre la force électromotrice induite et le courant dans l'enroulement magnétisant, c'est-à-dire avec le champ à la périphérie, est de $\frac{\pi}{2} - \psi + \chi$.

» Si dans les expressions précédentes nous supposons $\epsilon = 0$, nous avons

$$\alpha = \beta m, \quad \text{en posant} \quad m = 2\pi\sqrt{\mu\sigma F},$$

F étant la fréquence, et l'équation (1) devient

$$(2) \quad \mu_{\text{app.}} = \frac{\mu}{am\sqrt{2}} \left(\frac{\text{ch } 2ma - \cos 2ma}{\text{ch } 2ma + \cos 2ma} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

C'est bien la formule de J.-J. Thomson.

» De même, lorsque $\epsilon = 0$, on a

$$\text{tang } \psi = 1, \quad \psi = \frac{\pi}{4}$$

et

$$\text{tang } \chi = \frac{\sin 2ma}{\text{sh } 2ma}.$$

» On voit que pour les grandes valeurs de m dans ce cas $\chi = 0$. Le décalage limite entre le courant magnétisant et la force électromotrice induite est bien de 45° .

» Mais, comme nous l'avons dit plus haut, les résultats déduits des formules de J.-J. Thomson ne concordent pas avec les résultats expérimentaux.

» Pour chercher à faire disparaître ces divergences, nous pouvons chercher à admettre que ϵ n'est pas nul, c'est-à-dire qu'on ne doit pas négliger le pouvoir inducteur spécifique des métaux; au point de vue de la théorie électronique, cela revient à dire qu'il faut envisager, dans les phénomènes que nous étudions, non seulement l'action des électrons libres, mais aussi celle des électrons liés aux oscillateurs.

» Une semblable hypothèse n'est pas nouvelle. Elle a déjà été faite en 1905 par Broca pour expliquer les différences entre les valeurs de résistances de fils mesurées pour des fréquences de l'ordre de 10^6 et les valeurs de ces résistances calculées par la formule de Lord Kelvin.

» En partant de cette hypothèse, il est possible de déduire de la formule (1) la valeur à attribuer à ϵ pour retrouver les résultats expérimentaux.

» En particulier, dans le cas des tôles au silicium de 0,045 cm d'épaisseur ayant une résistivité de 45 micromhs-centimètre et une perméabilité apparente de 100 à la fréquence de 10000, on trouve pour ϵ , évalué dans le système électrostatique C. G. S., 5×10^{12} en supposant $\mu = 2000$, et 3×10^{12} en supposant $\mu = 1500$. Ces valeurs numériques sont bien du même ordre de grandeurs que celles de Broca ⁽¹⁾ qui trouvait, pour exprimer le pouvoir inducteur spécifique du cuivre, 10^6 pour des fréquences de l'ordre de $2,7 \times 10^{11}$ et 10^{12} pour des fréquences de l'ordre de 3×10^6 .

» Mais comme nous l'avons dit plus haut, la formule (1) peut prêter à certaines critiques auxquelles ne se prête pas la considération du décalage; c'est ce dernier point que nous allons envisager maintenant.

» Nous avons dit que, pour les tôles au silicium d'une épaisseur de 0,045 cm à la fréquence 40000, le décalage entre la force électromotrice induite et le courant magnétisant est de 30°, alors qu'il devrait être légèrement supérieur et presque égal à 45°.

» Pour ces tôles, en effet, l'angle χ est presque nul et le décalage est $\frac{\pi}{2} - \varphi$, φ étant égal à 45° comme nous l'avons vu lorsqu'on néglige le pouvoir inducteur spécifique. Or nous trouvons pour ce décalage un angle de 30°.

» Comment peut-on expliquer cette divergence entre la théorie et l'expérience sans faire intervenir l'existence du pouvoir inducteur spécifique?

» Il existe un phénomène dont nous n'avons pas tenu compte dans l'établissement de nos formules et qui pourrait peut-être expliquer cette diminution du décalage : c'est le phénomène de l'hystérésis.

» Nous allons chercher à introduire ce phénomène dans nos calculs en utilisant un mode opératoire indiqué par M. Brylinski, qui l'a utilisé pour tenir compte de l'hystérésis dans le calcul de la résistance d'un conducteur magnétique en courant alternatif.

» On admet que l'hystérésis ne déforme pas l'onde d'induction qui

(1) *C. R. Acad. Sc.*, p. 1677.

reste sinusoïdale et que son unique résultat est de produire un décalage φ entre le champ et l'induction, l'angle φ étant déterminé par la relation (1)

$$\sin \varphi = \frac{4 \omega}{\mu H^2},$$

μ perméabilité, H valeur maxima du vecteur champ, ω pertes par cycle et centimètre cube.

» Dans ces conditions, si en un point le champ est représenté par $H e^{i\omega t}$, l'induction est représentée par $\mu H e^{i\omega t - i\varphi}$, autrement dit, pour tenir compte de l'hystérésis, il suffira, dans les formules de Maxwell utilisées plus haut, de remplacer la perméabilité μ par $\mu e^{-i\varphi}$, c'est-à-dire que l'équation à résoudre devient

$$4 \pi \sigma \mu e^{-i\varphi} \frac{\partial z}{\partial t} + \varepsilon \mu z^{-i\varphi} \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}.$$

» Plaçons-nous tout de suite dans le cas envisagé par J.-J. Thomson; c'est-à-dire supposons négligeable le pouvoir inducteur spécifique, l'équation devient

$$4 \pi \mu \omega i (\cos \varphi - i \sin \varphi) = \gamma^2,$$

et en posant encore $\gamma = \alpha + \beta i$,

$$(3) \quad \begin{cases} 4 \pi \sigma \mu \omega \cos \varphi = 2 \alpha \beta, \\ 4 \pi \sigma \mu \omega \sin \varphi = \alpha^2 - \beta^2. \end{cases}$$

» Il suffit de résoudre ces équations et de porter les valeurs obtenues dans la formule (1) et dans les valeurs des angles ψ et χ pour avoir les valeurs de la perméabilité et des décalages dans le cas d'un métal magnétique sans pouvoir inducteur spécifique, mais doué d'hystérésis. On voit immédiatement que α et β , qui étaient égaux dans le cas où s'était placé J.-J. Thomson et qui cessaient de l'être quand on supposait l'existence d'un pouvoir inducteur spécifique, cessent également de l'être quand on tient compte de l'hystérésis.

» Ce que nous voulons connaître, c'est la valeur de $\tan \psi = \frac{\beta}{\alpha}$. Posons $\frac{\beta}{\alpha} = m$; nous voyons que m nous est donné par la relation

$$m^2 + 2 m \tan \varphi - 1 = 0,$$

(1) Pour l'établissement de cette relation, se rapporter au travail de M. BRYLINSKI, *Bulletin de la Société internationale des Électriciens*, 1912, p. 135.

d'où

$$m = -\tan \varphi + \sqrt{\tan^2 \varphi + 1},$$

ce qui peut s'écrire

$$m = \tan \psi = \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right).$$

» Ainsi l'hystérésis diminue le décalage entre le flux total et le champ magnétisant d'un angle $\frac{\varphi}{2}$ et augmente le décalage entre le courant et la force électromotrice induite. De même M. Brylinski a montré que, lorsqu'un conducteur magnétique est parcouru par un courant, l'effet de l'hystérésis est de diminuer la valeur limite entre le courant superficiel et le courant total.

» L'hystérésis, loin d'expliquer l'écart entre le décalage théorique et le décalage expérimental, ne pourrait que l'augmenter. Il importe de remarquer que cette conclusion n'est vraie que pour les valeurs limites pour lesquelles l'angle χ est négligeable devant l'angle ψ .

» Supposons d'abord l'hystérésis négligeable et cherchons la valeur de ε dans le cas où $\frac{\pi}{2} - \psi = 30^\circ$, c'est-à-dire dans le cas où $\tan \psi = \sqrt{3}$. Posons

$$\varphi = \frac{4\pi\sigma}{\varepsilon};$$

nous avons

$$\tan \psi = \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 + \frac{\varphi^2}{\omega^2}}}{-1 + \sqrt{1 + \frac{\varphi^2}{\omega^2}}}},$$

donc dans le cas envisagé

$$\frac{1 + \sqrt{1 + \frac{\varphi^2}{\omega^2}}}{-1 + \sqrt{1 + \frac{\varphi^2}{\omega^2}}} = 3,$$

d'où

$$\varphi = \omega \sqrt{3}.$$

» Pour la fréquence 40000 et pour une résistivité de 45 microhms-centimètre, cette expression conduit à

$$\varepsilon = 6 \times 10^{11},$$

valeur un peu plus faible que celle trouvée en envisageant la réduction de perméabilité, mais du même ordre de grandeur.

» La considération de l'hystérésis conduirait à trouver une valeur plus grande.

» On ne sait pas exactement quelle valeur introduire dans les formules, puisque l'angle φ n'est pas une constante, mais on ne commet pas une grosse erreur en introduisant les valeurs relatives à la superficie et, en admettant pour les tôles en question un coefficient de Steinmetz de 0,001, on trouve approximativement pour ϵ une valeur de 10^{12} .

» On voit que la considération d'un pouvoir inducteur spécifique permet d'expliquer les différences théoriques expérimentales.

» *Il ne s'agit là bien entendu que d'une hypothèse*, mais il est assez curieux de constater que nos expériences conduisent à des valeurs pour ϵ très sensiblement de même ordre de grandeur que ceux obtenus par Broca, qui opérait dans des conditions essentiellement différentes.

» Les nombres que nous trouvons pour le pouvoir inducteur spécifique des métaux ne concordent pas, nous devons le reconnaître, avec ceux que fournit l'optique.

» Hagen et Rubens, en mesurant pour les grandes longueurs d'onde le pouvoir réflecteur des métaux, ont trouvé un bon accord entre leurs résultats et les valeurs trouvées par la formule de Drude

$$r = 1 - 0,365 \sqrt{\frac{\rho}{\lambda}},$$

r pouvoir réflecteur, ρ résistance en ohms d'un fil de la substance de 1 m de long et de 1 mm² de section, λ longueur d'onde en microns.

» Ceci les a conduits à admettre que le pouvoir inducteur spécifique des métaux était de l'ordre de quelques unités ⁽¹⁾.

» Broca a contesté cette conclusion ⁽²⁾.

» Nous nous bornerons sur ce sujet à quelques remarques.

» Si, dans le cas de la réflexion, les résultats expérimentaux concordent avec ceux obtenus en utilisant des formules obtenues en ne tenant compte que des courants de convection dans les métaux, et en introduisant dans ces formules la résistivité mesurée en courant

⁽¹⁾ Max ABRAHAM, *Theorie der Electricität*, p. 323.

⁽²⁾ C. R. Acad. Sc

continu, il n'en est plus de même pour le cas de la réfraction ; c'est ce qui avait amené Lorenz à la conception d'électrons liés ou oscillateurs, c'est-à-dire au fond à la conception du pouvoir inducteur spécifique.

» En outre, on sait parfaitement que les pouvoirs inducteurs spécifiques des diélectriques mesurés au moyen des oscillations hertziennes sont en général notablement plus grands que ceux déduits par la loi de Maxwell des indices de réfraction mesurés pour les vibrations lumineuses. Ce n'est qu'à la température de l'air liquide que ces grandeurs semblent tendre vers la même valeur.

» Dans ces conditions, nous ne croyons pas devoir être étonnés d'obtenir, avec nos oscillations de l'ordre de 5×10^4 par seconde, des résultats différents de ceux que fournissent les oscillations de l'ordre du trillion.

» On doit au contraire trouver un pouvoir inducteur spécifique qui diffère notablement des valeurs usuelles lorsqu'on envisage des fréquences de l'ordre de celles de la lumière.

» Les équations de Lorenz auxquelles nous venons de faire allusion ont été établies pour expliquer certains phénomènes de l'électro-optique que n'expliquaient pas les équations de Maxwell que nous avons utilisées.

» Dans ces dernières le pouvoir inducteur spécifique n'intervient que comme simple paramètre.

» Dans la théorie de Lorenz au contraire ce pouvoir inducteur spécifique se déduit du mouvement des électrons liés. Il dépend donc de leur masse et l'on sait que la masse d'un électron, constante pour les vitesses usuelles, croît considérablement quand la vitesse augmente.

» Cette remarque est du reste indépendante des hypothèses que nous allons faire dans la suite sur le siège des oscillateurs donnant naissance aux courants de déplacement.

» Nous voudrions maintenant faire une hypothèse sur la nature de ce pouvoir inducteur spécifique.

» On peut évidemment supposer qu'il est dû à la présence dans le métal d'électrons libres à côté des électrons liés.

» Mais nous avons été frappé de ce fait que tous les phénomènes de viscosité ⁽¹⁾ ou de trainage magnétique, très voisins des phénomènes

(1) Travaux de Maurain, de Burgess et Ashton.

que nous venons d'étudier, se manifestent surtout dans les aciers électrolytiques très riches en hydrogène occlus.

» Les métaux, le fer surtout, sont de véritables éponges imprégnées de gaz.

» Ne pourrait-on supposer que c'est dans ces gaz que se produisent ces courants de déplacement qui se superposent en courant de conduction.

» Évidemment le pouvoir inducteur spécifique que nous trouvons est infiniment plus grand que celui de l'hydrogène, même sous de très fortes pressions, mais il importe tout d'abord de remarquer que nous ne nous trouverions pas en présence d'un condensateur ayant l'hydrogène pour diélectrique, mais plutôt dans le cas d'un condensateur dont le diélectrique serait rempli de poussières conductrices. On sait que, dans ce cas, on trouve un pouvoir inducteur spécifique beaucoup plus élevé que celui de la substance pure.

» De plus, l'hydrogène occlus doit être dans un état tout à fait différent de celui que nous lui connaissons et qui doit se rapprocher de ces minces couches de gaz qui, d'après Quincke, se trouvent à la surface des corps solides et où le gaz a la même densité que le solide.

» Évidemment cette conception du pouvoir inducteur spécifique des métaux dû à l'influence des gaz occlus n'est qu'une hypothèse. Néanmoins nous croyons bon d'attirer l'attention sur le rôle que peuvent jouer ces gaz et nous pensons qu'il conviendrait parfois, avant de chercher à expliquer les phénomènes par des hypothèses sur la constitution atomique, de voir si l'on ne pourrait pas les expliquer par des faits accessibles à nos sens.

» Ce rôle des gaz occlus se manifeste, du reste, dans beaucoup d'autres phénomènes.

» On sait que la nature des gaz occlus dans un métal influe sur les phénomènes photo-électriques auxquels il donne naissance. On sait également que l'émission d'ions par un fil de platine incandescent diminue beaucoup lorsqu'on a fait préalablement subir à ce fil un traitement prolongé pour le débarrasser des gaz occlus.

» Tout cela semble indiquer que souvent ces gaz jouent un rôle qu'on est quelquefois tenté, à première vue, d'attribuer aux atomes du métal.

» Il est bien entendu que ce que nous venons de dire ne constitue

que des hypothèses basées sur des expériences qui, faites dans un but utilitaire, n'ont pas toujours été réalisées dans les meilleures conditions pour vérifier ces hypothèses.

» Il est bien certain que les idées émises plus haut appellent de nouvelles expériences qu'il serait intéressant de faire sur des substances non magnétiques. Mais des champs plus intenses seraient alors nécessaires et, étant données les difficultés d'emploi de l'arc de Poulsen, je pense qu'il conviendrait pour les entreprendre d'attendre la réalisation des alternances à haute fréquence, ce qui ne saurait beaucoup tarder aujourd'hui.

» Dans un précédent travail (1), étudiant les propriétés magnétiques des tôles soumises à des champs alternatifs de fréquence de l'ordre des fréquences, dites des fréquences musicales, j'étais arrivé à la conclusion que les formules J.-J. Thomson permettaient de prédéterminer les propriétés. Cette conclusion n'est pas en contradiction avec ce qui a été dit plus haut. Si l'on examine en effet les formules donnant les valeurs de α^2 et de β^2 , on voit que la fréquence y intervient sous le radical au carré pour la conductivité, à la quatrième puissance pour le pouvoir inducteur spécifique. Le terme qui contient la conductivité devient donc rapidement prédominant quand la fréquence diminue.

» En particulier, dans le cas d'un courant de fréquence 400 pour du fer de conductivité 10^{-4} , on a

$$\frac{\rho^2}{\omega^2} = 3 \cdot 10^4 \quad \text{et} \quad \tan \psi = 1 + \frac{1}{30.000},$$

en admettant $\varepsilon = 10^{12}$. Cette valeur de $\tan \psi$ diffère donc de très peu de la valeur 1 à laquelle conduisait la formule de Thomson.

» Notons en passant que les formules données plus haut se simplifient par des fréquences un peu élevées de l'ordre des courbes longueurs d'ondes.

» On voit facilement que dans ce cas on a

$$\mu_{\text{app.}} = \frac{1}{\alpha \omega} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \quad \text{et} \quad \tan \psi = \frac{q \omega}{\rho}.$$

» Nous voudrions pour terminer ce travail résumer les idées que nous

(1) *Bulletin de la Société internationale des Électriciens*, février 1912.

avons voulu émettre. Une comparaison avec les diélectriques nous permettra d'y arriver facilement.

» Tous les électriciens savent que les diélectriques présentent des pertes, c'est-à-dire qu'à côté du courant de déplacement il semble se produire dans le diélectrique un courant de conduction. De même il semble résulter de nos recherches qu'il fallait envisager dans les métaux, à côté du courant de conduction, un courant de déplacement. Beaucoup d'hypothèses ont été faites pour expliquer les pertes dans les diélectriques; certains physiciens, Maxwell le premier, attribuaient les pertes à l'hétérogénéité des diélectriques; d'autres, comme tout récemment Décombe, y voient une propriété intraatomique de la substance. Le rôle que nous avons attribué aux gaz occlus se rapproche de l'hypothèse de Maxwell pour les diélectriques, mais, comme nous l'avons déjà dit, on peut faire d'autres hypothèses et des expériences plus nombreuses sont nécessaires pour trancher la question.

M. E. BRYLINSKI, Président. — « Je désirerais compléter par quelques remarques la Communication que vous venez d'entendre.

» Mais je tiens tout d'abord à remercier en votre nom M. Jouaust de l'intéressant travail qu'il a résumé pour nous, et M. Janet du lumineux exposé qu'il vient de nous faire de ce travail. L'œuvre de M. Jouaust est un excellent spécimen des méthodes du Laboratoire central, car c'est un travail exécuté dans un but technique, mais avec un esprit élevé, une méthode sûre et une précision dans les essais qui permettent d'en tirer des conclusions scientifiques rigoureuses. Il est, par exemple, intéressant de constater que l'hystérésis ne peut aucunement donner l'explication de la divergence importante que font ressortir les expériences entre les valeurs de la perméabilité apparente et les résultats de la théorie de J.-J. Thomson.

» Des motifs profondément respectables ont privé M. Jouaust du plaisir de vous exposer lui-même ses essais, ses calculs et les très intéressantes considérations qu'il en a déduites, mais rien ne pouvait atténuer la légère peine qu'il en a peut-être ressentie, autant que d'avoir obtenu le concours d'un interprète comme M. Janet.

» La question du pouvoir inducteur spécifique, que M. Jouaust s'est borné à traiter brièvement, ce qui était bien naturel puisque son

travail portait essentiellement sur une question d'ordre magnétique, me paraît mériter quelques réflexions.

» Tout d'abord la symétrie très grande qui existe dans le champ électromagnétique entre les vecteurs champ électrique et champ magnétique donne à penser que s'il y a une perméabilité magnétique apparente, il existe vraisemblablement aussi un pouvoir spécifique apparent.

» Reprenons les équations du champ électromagnétique, sans opérer la dérivation par rapport à x qui se trouve dans la première équation que vous venez de lire, et en désignant par H le champ électrique (dirigé suivant les y) et par $\mathcal{H}$ le champ magnétique (dirigé suivant les z). On peut, dans ces équations ⁽¹⁾ éliminer $\mathcal{H}$ au lieu de H et l'on arrive à une équation différentielle de la même forme, qui admet la même intégrale que celle donnée par M. Jouaust.

» On peut, de même que l'a fait M. Jouaust pour $\mathcal{H}$, considérer H

⁽¹⁾ Donnons ici brièvement et sans aucune explication ces calculs, établis en suivant pas à pas la marche indiquée par M. Jouaust pour le champ magnétique :

$$\begin{aligned} 4\pi\sigma H + \varepsilon \frac{\partial H}{\partial t} &= -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial x}, \\ -\mu \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial t} &= \frac{\partial H}{\partial x}, \\ 4\pi\sigma\mu \frac{\partial H}{\partial t} + \mu\varepsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} &= \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}, \\ H &= Be^{\pm(\alpha+\beta i)x+i\omega t}, \\ H &= \frac{H_0 e^{i\omega t}}{e^{(\alpha+\beta i)\alpha} - e^{-(\alpha+\beta i)\alpha}} [e^{(\alpha+\beta i)x} - e^{-(\alpha+\beta i)x}], \\ \int_0^\alpha \varepsilon H dx &= \frac{\varepsilon_0 H_0 e^{i\omega t}}{(\alpha + \beta i) \operatorname{sh}[(\alpha + \beta i)\alpha]} \{ \operatorname{ch}[(\alpha + \beta i)x] \}_0^\alpha, \\ \operatorname{tang} \chi' &= \frac{\sin \beta \alpha}{\operatorname{sh} \alpha \alpha}, \\ \varepsilon_{\text{app}} H_0 \alpha e^{i\omega t} &= \frac{\varepsilon H_0 e^{i\omega t - i\psi + i\chi'}}{\sqrt{x^2 + \beta^2}} \sqrt{\frac{\operatorname{ch} \alpha x - \cos \beta \alpha}{\operatorname{ch} \alpha x + \cos \beta \alpha}}, \\ \varepsilon_{\text{app}} &= \frac{\varepsilon}{\alpha \sqrt{x^2 + \beta^2}} \sqrt{\frac{\operatorname{ch} \alpha x - \cos \beta \alpha}{\operatorname{ch} \alpha x + \cos \beta \alpha}}, \end{aligned}$$

ou, dès que $\operatorname{ch} \alpha x$ devient assez grand devant $\cos \beta \alpha$,

$$\varepsilon_{\text{app}} = \frac{\varepsilon}{\alpha \sqrt{x^2 + \beta^2}}.$$

comme indépendant de y et de z si la plaque est suffisamment longue et large par rapport à son épaisseur, ou même, dans le cas d'une plaque épaisse, par rapport à la profondeur de pénétration du courant. Une petite différence se manifeste cependant dans les conditions aux limites; tandis que le plan médian est un plan de symétrie complète pour le champ magnétique, ce plan médian est, pour le champ électrique, un plan de symétrie avec changement de signe. Si, par exemple, nous désignons par $H_0 e^{i\omega t}$ le champ électrique sur l'une des faces de la plaque, il aura pour valeur

$$- H_0 e^{i\omega t}$$

sur la face opposée.

» Il en résulte que l'intégration du flux d'induction électrostatique ne doit être faite que du plan médian à la surface, et que les formules finales ne sont pas tout à fait identiques à celles de la perméabilité magnétique, tout en restant extrêmement analogues de forme (').

» Cette notion de pouvoir inducteur apparent permettrait sans doute d'expliquer la diminution de la valeur du pouvoir inducteur sous des fréquences de quelques dizaines de mille périodes par seconde, si nos souvenirs sont exacts, qu'ont signalée certains auteurs pour quelques diélectriques il y a déjà plusieurs années. Il pourrait être intéressant de rechercher si ces expériences se prêtent à une vérification de la formule à laquelle nous sommes parvenus.

» Lorsque la fréquence devient suffisamment élevée, la formule se simplifie dans les mêmes conditions que celle de la perméabilité apparente, et l'on obtient l'expression

$$\varepsilon_{\text{app}} = \frac{1}{a\omega} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}}$$

qui se signale par son extrême simplicité.

» Le rapprochement de cette formule avec celle de la perméabilité apparente amène immédiatement aux trois remarques suivantes :

(1) Je désignerai, pour préciser, par *pouvoir inducteur apparent* le rapport de la valeur maxima du flux d'induction électrostatique dans une moitié de la plaque à la valeur maxima du flux de force dans la même moitié en supposant que le champ électrique conserve dans toute cette moitié la valeur qu'il a à la surface. On pourrait concevoir d'autres définitions; par exemple, une définition identique à celle de M. Jouaust pour la perméabilité apparente introduirait simplement de plus un facteur numérique égal à 2.

» On a

$$\varepsilon_{app} \mu_{app} = \frac{1}{a^2 \omega^2},$$

valeur indépendante à la fois de ε , μ et σ , ce qui est assez singulier.

» En second lieu,

$$\frac{\varepsilon_{app}}{\mu_{app}} = \frac{\varepsilon}{\mu}.$$

Ce qui montre que le pouvoir inducteur spécifique et la perméabilité magnétique sont, toujours dans le cas où l'on peut appliquer les formules simplifiées, modifiées dans le même rapport. Cette relation est même plus générale, car elle est valable dès que $\cos \beta a$ devient négligeable devant $\cosh \alpha x$.

» Enfin la perméabilité et le pouvoir inducteur apparents dépendent du produit $a\omega$, de telle sorte que si l'on envisage une plaque et une fréquence données, on obtiendra les mêmes résultats pour une fréquence égale à n fois celle envisagée précédemment avec une plaque dont l'épaisseur sera réduite à $\frac{1}{n}$ de l'épaisseur primitive.

» Ces formules qui ne s'appliquent, rappelons-le, qu'aux fréquences suffisamment élevées surprennent un peu par leur simplicité, et il ne paraît pas inutile de les examiner de plus près.

» L'intervention de l'épaisseur de la plaque se comprend aisément. Elle signifie que le champ électromagnétique est pratiquement localisé, comme on le sait depuis longtemps, dans deux couches superficielles très minces, dont l'épaisseur a pour valeur

$$\frac{1}{\omega \sqrt{\mu \varepsilon}}.$$

» Si, en effet, on appelle b cette épaisseur, on a

$$2 b \mu \mathcal{H}_0 e^{i\omega t} = 2 a \mu_{app} \mathcal{H}_0 e^{i\omega t},$$

d'où

$$b = a \frac{\mu_{app}}{\mu} = a \frac{\varepsilon_{app}}{\varepsilon} = \frac{1}{\omega \sqrt{\mu \varepsilon}}.$$

Cette expression est susceptible d'une interprétation intéressante, car $\frac{1}{\sqrt{\mu \varepsilon}}$ est la valeur de la vitesse v de propagation du front de l'onde électromagnétique dans la plaque, de telle sorte que si l'on appelle λ la

longueur d'onde (ou la pseudo longueur d'onde, car l'amortissement est considérable en pareil cas), on aura

$$b = \frac{v}{\omega} = \frac{\lambda}{2\pi}.$$

» L'onde ne pénètre donc pratiquement que jusqu'à une fraction $\frac{1}{2\pi}$ de la longueur d'onde du front d'onde.

» La proportionnalité à l'inverse de la fréquence s'explique par des considérations analogues. L'augmentation de la fréquence réduit l'épaisseur de la couche de pénétration et par conséquent la valeur de la perméabilité et du pouvoir inducteur apparents.

» Mais c'est ici qu'un obstacle se dresse, et nous ramène aux considérations sur le pouvoir inducteur des métaux que M. Jouaust nous a brièvement rappelées : lorsque la fréquence augmente sans limites, les formules feraient tendre vers zéro la perméabilité et le pouvoir inducteur apparents.

» Cette conclusion ne paraît pas confirmée par l'expérience en ce sens que, pour les fréquences de l'ordre de celles de la lumière, le pouvoir inducteur des métaux semble être voisin de l'unité, et qu'il serait bien extraordinaire que la formule amène précisément à ce résultat. Peut-être n'est-il pas inutile, bien que les éléments de la discussion de ce point particulier soient connus de tous, de les grouper sommairement pour en faire un bref résumé.

» Tout d'abord, comme l'a nettement rappelé M. Jouaust, le fait que le pouvoir inducteur des métaux serait voisin de l'unité pour les fréquences de l'échelle lumineuse ne saurait être en rien un obstacle à l'existence d'un pouvoir inducteur de valeur importante pour des fréquences considérablement moindres.

» L'une des premières remarques suscitées par la théorie électromagnétique de la lumière de Maxwell a été précisément que les indices de réfraction étaient très voisins de l'unité pour tous les corps transparents, alors que certains diélectriques avaient des pouvoirs inducteurs élevés arrivant jusqu'à 80 environ. Cette objection s'est levée d'elle-même lorsqu'on a su produire des ondes électromagnétiques de fréquence élevée, tout en restant bien inférieures à celles de la lumière, car on a constaté que le pouvoir inducteur d'un même

corps diminuait lorsque la fréquence augmentait. C'est là vraisemblablement le phénomène que nous venons d'examiner rapidement en appliquant simplement au champ électrique les calculs établis par M. Jouaust pour le champ magnétique.

» Mais la théorie des électrons amène à préciser et à modifier sensiblement cette explication. On peut dire, en effet, de la physique ancienne, celle qu'on a ainsi dénommée depuis la considération des électrons, qu'elle est, comme nous l'a rappelé il y a quelques années M. Langevin, la physique de l'éther. Cette physique avait bien, tout d'abord, rencontré la matière pondérable sur sa route; elle avait, par la chimie, par la chaleur, par l'optique, constaté que cette matière comportait des groupements variés de corpuscules distincts, inséçables par les moyens d'investigation alors connus, qui se trouvaient perpétuellement en agitation très rapide, et qui pouvaient dans certaines conditions spéciales réagir sur l'éther ou même subir des réactions de sa part. Mais elle n'avait pas trouvé le moyen de pénétrer profondément dans la nature de ces corpuscules et de leurs groupements et avait dû se borner à en tenir compte en introduisant dans les équations certains paramètres pratiquement constants, comme la masse mécanique, le pouvoir inducteur spécifique, la perméabilité magnétique et quelques autres qui sortent de notre sujet.

» Cette manière de procéder, la seule logique, s'est montrée suffisante tant qu'on n'a pas eu à s'occuper des régions de réaction intense de l'éther sur la matière. Lorsqu'on est tombé dans ces régions, par exemple avec la dispersion optique, on a dû se borner provisoirement à noter les résultats expérimentaux en attendant de nouveaux progrès de la Science.

» Les expériences portant sur les électrons ont eu pour résultat de multiplier ces points d'insuffisance de l'ancienne théorie, en même temps qu'elles donnaient de nouveaux moyens pour poursuivre plus profondément les investigations.

» C'est ainsi que, pour faire une comparaison qui n'est pas une assimilation, car les fréquences et les vitesses sont des grandeurs bien différentes, la notion de masse mécanique qui donnait des résultats pratiquement exacts pour les vitesses notablement inférieures à celle de la lumière, s'est révélée insuffisante quand on est arrivé à des vitesses de cet ordre. Les formules qui ont été imaginées font inter-

venir au carré le rapport de la vitesse envisagée à celle de la lumière, ou plutôt l'excès de ce carré sur l'unité, en dénominateur, de telle sorte que la masse totale reste presque rigoureusement égale à la masse statique tant que la vitesse ne s'approche pas beaucoup de celle de la lumière, et que, quand cette éventualité se réalise, la masse totale croît très vite et sans limites.

» On peut concevoir de même que, tant que les fréquences employées restent notablement inférieures à celles de la lumière, les formules de la théorie électromagnétique s'appliquent sans erreur appréciable, mais que, lorsqu'on arrive à des valeurs de cet ordre pour la fréquence, la formule générale dont la formule électromagnétique n'est un cas particulier, d'un domaine d'application d'ailleurs très étendu, donne des résultats tout à fait différents sans que ces résultats infirment en rien ceux qui ont été obtenus pour des fréquences beaucoup plus basses.

» Ici entre en jeu une différence essentielle entre les fréquences et les vitesses. Alors, en effet, que l'esprit admet assez aisément que, dans le monde physique tel que nous le connaissons, il ne puisse pas se produire de vitesse supérieure à celle de la lumière, les rayons ultraviolets et les rayons X montrent qu'il existe certainement des vibrations de fréquences bien supérieures à celle de la lumière. Il semble naturel d'admettre que l'inertie des corpuscules matériels soit trop grande pour que ces corpuscules subissent l'action de l'éther en mouvement à des fréquences aussi élevées, et cette manière de voir paraît, confirmée au moins dans une certaine mesure par l'impossibilité où l'on s'est trouvé de faire ressortir, autrement que dans des cas très particuliers, une réfraction des rayons X. Si l'indice de réfraction de ces vibrations est égal à l'unité, c'est que leur vitesse reste inaltérée en passant d'un corps à l'autre et, par conséquent, qu'il n'y a pas de réaction mutuelle entre elles et la matière. On est porté, dans ces conditions, à supposer que la théorie électromagnétique ordinaire, qui est visiblement en défaut dans la région des fréquences lumineuses, pourrait redevenir applicable lorsque cette région serait dépassée par l'emploi de fréquences suffisamment élevées. Mais l'absence de réfraction indiquerait en ce cas qu'on ne pourrait conserver les mêmes paramètres et il semble bien qu'on en puisse conclure que, dans ces régions de fréquence extrêmement élevées, le pouvoir induc-

teur spécifique de tous les corps devrait être pris uniformément égal à l'unité.

» Je n'insiste pas sur ces considérations qui n'ont qu'un but, c'est de tenter d'ouvrir une discussion sur la Communication de M. Jouaust; je souhaite que plusieurs d'entre vous suivent mon exemple et nous exposent les conséquences de cette Communication qu'ils croiront intéressant de nous signaler. »

LES OSCILLATIONS A AMORTISSEMENT COMPLEXE ;

PAR MM. A. BLONDEL ET F. CARBENAY.

M. C.-F. GUILBERT. — « Messieurs, le travail que je vais vous présenter de la part de MM. Blondel et Carbenay se rapporte à l'étude des systèmes oscillants amortis : 1° par un couple résistant constant en valeur absolue, mais agissant toujours en sens contraire de la déviation et, par suite, changeant de signe avec le sens de celle-ci ; 2° par un couple résistant directement proportionnel à la vitesse angulaire $A \frac{d\theta}{dt}$. Certains appareils oscillant sur pivots, l'indicateur de Watt, etc. sont des exemples de tels systèmes soumis à la fois à des forces de frottement de solides et à la résistance de l'air.

I. — MOUVEMENT LIBRE.

» 1. *Oscillations libres.* — Soient : K le moment d'inertie, par rapport à l'axe, de la partie mobile ; $A \frac{d\theta}{dt}$ le couple résistant proportionnel à la vitesse angulaire ; $\pm D$ le couple résistant discontinu constant pour un signe déterminé de $\frac{d\theta}{dt}$; $C\theta$ le couple directeur ; $\varepsilon = \frac{D}{C}$ un rapport que nous appellerons l'*angle limite d'incertitude*.

» L'équation générale du mouvement libre est

$$(1) \quad K \frac{d^2\theta}{dt^2} + A \frac{d\theta}{dt} + C(\theta \pm \varepsilon) = 0,$$

ε étant précédé du signe +, quand $\frac{d\theta}{dt} > 0$, et du signe —, dans le cas contraire (ε passe par zéro quand $\frac{d\theta}{dt} = 0$).

» En posant $\theta' = \theta \pm \varepsilon$, nous sommes ramenés à l'équation classique.

» *Premier cas : $A^2 - 4KC < 0$.* — Le système a une infinité de positions d'équilibre statique, comprises entre $-\varepsilon$ et $+\varepsilon$.

» Dans les oscillations, tout se passe comme si le mouvement était simplement amorti en raison directe de la vitesse, par rapport à une position d'équilibre définie par $\theta = \pm \varepsilon$, suivant que le déplacement a lieu dans un sens ou dans l'autre.

» Soient : δ le décrément logarithmique des oscillations libres (si l'amortissement $A \frac{d\theta}{dt}$ existait seul $\delta = \frac{A}{2K} \frac{T}{2}$), et (θ_n) la valeur absolue de l'élongation θ_n .

» Il résulte de ce qui précède que

$$(2) \quad (\theta_n) + \varepsilon = [(\theta_{n-1}) - \varepsilon] e^{-\delta},$$

d'où l'on déduit, tous calculs faits, en considérant p oscillations successives,

$$(2') \quad (\theta_n) = (\theta_{n-p}) e^{-p\delta} - \varepsilon \frac{1 + e^{-\delta}}{1 - e^{-\delta}} [1 - e^{-p\delta}],$$

par suite

$$(3) \quad \begin{aligned} (\theta_m) - (\theta_n) &= [(\theta_{m-p}) - (\theta_{n-p})] e^{-p\delta}, \\ \delta &= \frac{1}{p} \ln \frac{(\theta_{m-p}) - (\theta_{n-p})}{(\theta_m) - (\theta_n)}. \end{aligned}$$

» Ainsi, il sera facile de déterminer expérimentalement le décrément et, par suite, le coefficient d'amortissement A sans connaître, *a priori*, la partie constante D du couple de frottement. Il suffira de trois lectures seulement si l'on fait $n - p = m$.

» D'autre part, l'équation (2') détermine l'angle limite d'incertitude

$$(4) \quad \varepsilon = \frac{(\theta_{n-p}) - (\theta_n) e^{p\delta}}{1 - e^{p\delta}} \frac{1 - e^{\delta}}{1 + e^{\delta}}.$$

» Si l'amortissement proportionnel à la vitesse est très faible, on peut admettre $1 + e^{\delta} = 2$; d'où

$$(5) \quad \left\{ \begin{aligned} \varepsilon &= \frac{(\theta_{n-p}) - (\theta_n) e^{p\delta}}{2} \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1 - e^{\delta}}{1 - e^{p\delta}} = \frac{(\theta_{n-p}) - (\theta_n) e^{p\delta}}{2p}, \\ \varepsilon &= \frac{1}{2p} \frac{(\theta_m)(\theta_{n-p}) - (\theta_n)(\theta_{m-p})}{(\theta_m) - (\theta_n)}. \end{aligned} \right.$$

» Si δ est nul, c'est-à-dire s'il n'existe pas d'amortissement proportionnel à la vitesse, l'équation (2) montre que les élongations suc-

cessives *décroissent linéairement* ⁽¹⁾; la différence des valeurs absolues de deux elongations consécutives est égale au double de l'angle limite (*fig. 1*).

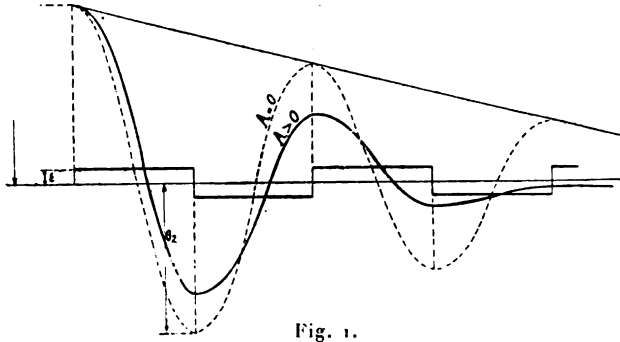


Fig. 1.

» Dans le cas présent $A^2 - 4KC < 0$, le système dévié de (θ_1) à l'instant t_1 s'arrête au temps $t_1 + \tau$ fini. Étant donnés δ , ε et θ_1 on peut se proposer de calculer τ ; dans l'équation (2') faisons $p = n - 1$, on a

$$(\theta_n) = \theta_1 e^{-(n-1)\delta} - \varepsilon \frac{1 + e^{-\delta}}{1 - e^{-\delta}} [1 - e^{-(n-1)\delta}].$$

Or, il existe un nombre entier $n = N$, et un seul, tel que

$$0 \leq (\theta_N) \leq \varepsilon,$$

et l'on voit facilement, en désignant par T la pseudo-période

$$\frac{2\pi}{\sqrt{\frac{C}{K} - \left(\frac{A}{2K}\right)^2}},$$

que

$$\tau = (N-1) \frac{T}{2}.$$

» En particulier, si δ est très faible, N sera donné par les inégalités

$$0 \leq (\theta_1) \frac{e^{-(N-1)\delta}}{\varepsilon} - 2(N-1) \leq 1$$

(1) Ceci résulte d'ailleurs de l'application immédiate du principe de la conservation de l'énergie; prenons comme limites d'intégration deux elongations consécutives

$$\int_{\theta_2}^{\theta_1} (D d\theta + C\theta d\theta) = 0, \quad \text{d'où} \quad 2\frac{D}{C} = (\theta_1) - (\theta_2).$$

et si δ est nul

$$0 \leq \frac{(\theta_1)}{\varepsilon} - 2(N-1) \leq 1.$$

» *Deuxième cas* : $A^2 - 4KC \geq 0$. — Le mouvement est apériodique. Si l'on abandonne le système dévié initialement d'un angle positif θ_1 , l'équation du mouvement se réduit à

$$K \frac{d^2 \theta}{dt^2} + A \frac{d\theta}{dt} + C(\theta - \varepsilon) = 0.$$

» Le mouvement est apériodique, avec une position d'équilibre définie par $\theta = \varepsilon$ (fig. 2).

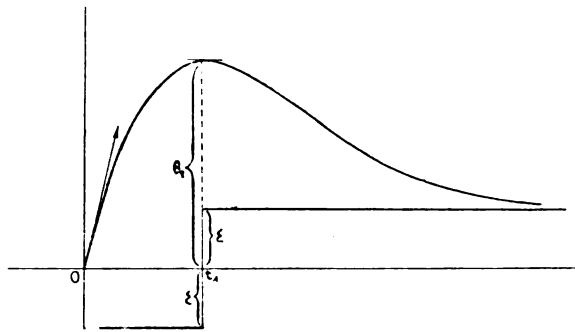


Fig. 2.

» Contrairement au cas précédent, le système ne s'arrête qu'au bout d'un temps infini et à la position $\theta = \varepsilon$; il en résulte qu'on peut déterminer l'angle limite, en abandonnant le système dévié d'abord positivement, puis négativement.

» *Remarque.* — Dans le cas particulier d'un galvanomètre, par exemple, on pourra déterminer l'angle limite ε par un procédé statique et relever la loi de variation linéaire θ en fonction de l'intensité du courant, dont on fera croître la valeur d'une manière continue et très lente. L'ordonnée, à l'origine de la droite ainsi obtenue,

$$C\theta + D = GI \quad (\theta > 0),$$

mesure précisément l'angle limite, et le coefficient angulaire de cette droite donne la valeur de la sensibilité statique

$$\gamma = \frac{d\theta}{dI} = \frac{G}{C}.$$

» Quant à A , on le déterminera par la mesure de l'amplitude à la résonance, comme nous l'indiquerons plus loin.

» 2. *Vérification expérimentale.* — Un système oscillant à frottement a été réalisé sous forme d'un oscillographe à fer doux pivoté entre crapaudines dans le champ d'un puissant solénoïde, isolé du sol par double suspension élastique; en modifiant l'intensité du courant inducteur, on fait varier à volonté la fréquence d'oscillations propres du barreau (qui lui est sensiblement proportionnelle au-dessous de la saturation) ⁽¹⁾. Ce barreau est soumis à un champ transversal produit par deux petites bobines dont l'axe est perpendiculaire à celui du solénoïde directeur. Les déviations étaient enregistrées photographiquement sur bande déroulée à vitesse constante.

» *Caractéristiques du barreau de fer doux.* — Le barreau a les dimensions suivantes :

hauteur : 2^{mm},45; largeur : 2^{mm},15; épaisseur : 0^{mm},5,

ce qui correspond à un moment d'inertie

$$K = 7,8 \frac{2,45 \times 2,15^3}{12} 0,5 \cdot 10^{-8} = 7,9 \cdot 10^{-8} \text{ C.G.S.},$$

soit, pour tenir compte de l'axe et du petit miroir (de $\frac{8}{10}$ de millimètre de côté),

$$K = 8,5 \cdot 10^{-8} \text{ C.G.S.}$$

» *Mesure des fréquences d'oscillations propres.* — L'amortissement proportionnel à la vitesse du système étant très faible, nous avons adopté la méthode de résonance. On envoyait, dans l'enroulement déviant, du courant alternatif du secteur (50 ~) en accordant le système à la résonance successivement avec les divers harmoniques; on note l'intensité I_n du courant traversant le solénoïde directeur quand le terme harmonique de rang n est en résonance. La fonction

$$n = f(I_n)$$

est très sensiblement linéaire pour les fréquences comprises entre 50 et 500 ⁽²⁾.

(1) Cf. A. BLONDEL, *La Lumière électrique*, t. XVIII, 1912, p. 71.

(2) Le solénoïde directeur ne contenant pas de fer, le couple directeur $\mathcal{M}\mathcal{C}$, au-dessous de la saturation, est proportionnel à I^2 et imprime donc au barreau une fréquence d'oscillations propres proportionnelles à I .

» 1° *Le barreau oscille dans l'air (à la pression atmosphérique).* — On constate un amortissement dû aux causes suivantes : *a*, frottement de l'axe du barreau contre les crapaudines; *b*, résistance de l'air; *c*, hystérésis magnétique et courants d'induction.

» Quelques résultats caractéristiques sont consignés dans le Tableau ci-après :

Intensité du courant dans le solénoïde directeur.	Fréquence propre.	Décroissement δ (en C.G.S.).	Coefficient d'amor- tissement A (en C.G.S.).	Angle limite ε (en C.G.S.).	Couple de frottement D (en C.G.S.).
3 ^{amp}	60	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$7,15 \cdot 10^{-5}$	$8,6 \cdot 10^{-3}$	$103 \cdot 10^{-3}$
6....	120	4,6	18,8	2,15	103
9....	180	5,2	32	0,89	96

» On voit que le décroissement augmente avec la fréquence, de sorte que A en fonction de celle-ci a une allure parabolique. Ce résultat

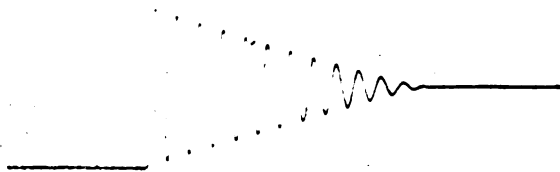


Fig. 3.

est dû en partie à l'amortissement par courants de Foucault qui, dans notre cas, est de la forme $a\mathcal{H}^2 \frac{d\theta}{dt}$ ($\mathcal{H}$ étant l'intensité du champ directeur). Or, $\mathcal{H}$ étant proportionnel à la fréquence propre, au-dessous de la saturation du barreau, cet amortissement s'exprime par

$$a' \left(\frac{1}{T} \right)^2 \frac{d\theta}{dt}.$$

» Une autre partie de l'amortissement provient de l'hystérésis. On peut négliger ici l'amortissement par l'air.

» Les deux photographies ci-contre représentent des oscillations libres, amorties respectivement soit par un couple de frottement (*fig. 3*), soit par un couple mixte (*fig. 4*). On vérifie sur la première

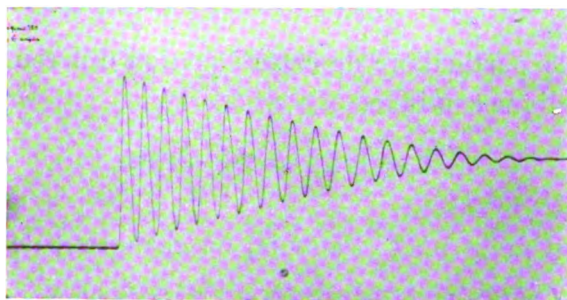


Fig. 4.

que les sommets sont sur une ligne droite; sur la seconde, l'exponentielle réapparaît.

» 2° *Le barreau oscille dans un liquide peu visqueux* ⁽¹⁾. — Le tube contenant l'équipage étant rempli de benzine ou d'éther, on observe que l'amortissement de frottement du pivot devient négligeable devant l'amortissement dû à la résistance de la benzine. Le décrément, plus important, diminue maintenant avec la fréquence.

II. — OSCILLATIONS FORCÉES.

» 1. Supposons le système soumis à un couple déviant périodique, développable en série de Fourier,

$$G\Phi(t) = G \sum I_m \cos(m\omega t + \varphi_m);$$

l'équation du mouvement prend la forme

$$(1) \quad K \frac{d^2 \theta}{dt^2} + A \frac{d\theta}{dt} + Df\left(\frac{d\theta}{dt}\right) + C\theta = G\Phi(t)$$

⁽¹⁾ Nous n'avons pas considéré le cas d'un liquide très visqueux, tel qu'il est employé dans les oscillographes, car le mouvement devient alors apériodique.

L'expérience a depuis longtemps démontré qu'avec un liquide réalisant l'amortissement critique, l'oscillographe à pivots peut donner des courbes sensiblement aussi exactes qu'avec l'oscillographe à bande de torsion.

avec

$$f\left(\frac{d\theta}{dt}\right) = \pm 1 \quad \text{suivant que} \quad \frac{d\theta}{dt} \gtrless 0$$

et

$$\theta = \text{const.}, \text{ pour } [G\Phi(t)]_{\max} \leq D.$$

» L'intégrale particulière de cette équation différentielle est une fonction périodique continue

$$(2) \quad \theta = \sum u_n \sin n\omega t + \sum v_n \cos n\omega t,$$

telle qu'en tout point où $\frac{d\theta}{dt}$ s'annule, en changeant de signe, il y a discontinuité de $\frac{d^2\theta}{dt^2}$, ce qui a pour effet de faire réapparaître l'intégrale générale de l'équation sans second membre à chaque maximum ou minimum. Lorsque, pendant la durée du maximum de l'élongation, l'appareil s'arrêtera, il ne pourra repartir qu'après la variation du couple déviant, diminuée de la variation du couple d'inertie aura dépassé la valeur D du couple résistant dû au frottement; cette variation atteinte, l'appareil se remet en route comme à un premier départ avec élongation initiale égale à la valeur maxima.

» Soient :

γ la sensibilité statique absolue, $\gamma = \frac{G}{C}$;

Γ_n la sensibilité harmonique d'ordre n , $\Gamma_n = \frac{G}{\sqrt{(C - Kn^2\omega^2)^2 + (An\omega)^2}}$;

ε l'angle limite d'incertitude, $\varepsilon = \frac{D}{C}$.

» 2. Supposons la fonction θ déterminée en régime et prenons le cas où il y a des paliers. Dans l'intervalle de temps pour lequel $\frac{d\theta}{dt}$ a un signe donné, positif par exemple,

$$\theta = \sum \Gamma_n I_n \cos(n\omega t + \psi_n) - \varepsilon + M_0 e^{\alpha t} + N_0 e^{\beta t};$$

avec

$$\tan(\varphi_n - \psi_n) = \frac{An\omega}{C - Kn^2\omega^2} \quad \text{et} \quad \alpha, \beta = \frac{-A \pm \sqrt{A^2 - 4KC}}{2K},$$

θ atteint son maximum Θ au temps t_1 défini par

$$(3) \quad 0 = -\omega \sum n \Gamma_n I_n \sin(n\omega t_1 + \psi_n) + \alpha M_0 e^{\alpha t_1} + \beta N_0 e^{\beta t_1},$$

et l'on a

$$(4) \quad \Theta = \Sigma \Gamma_n I_n \cos(n\omega t_1 + \psi_n) - \varepsilon + M_0 e^{\alpha t_1} + N_0 e^{\beta t_1};$$

θ conserve cette valeur jusqu'à l'époque t_2 à partir de laquelle le produit de $\Phi(t)$ par la sensibilité statique γ devient inférieur à $(\Theta - \varepsilon)$:

$$(5) \quad \Theta - \varepsilon = \gamma \Sigma I_m \cos(m\omega t_2 + \varphi_m),$$

et ainsi de suite.

» De t_2 à t_3 , $\frac{d\theta}{dt}$ est négatif et l'on a, dans cet intervalle,

$$\theta = \Sigma \Gamma_n I_n \cos(n\omega t + \psi_n) + \varepsilon + M_2 e^{\alpha t} + N_2 e^{\beta t};$$

M_2 et N_2 s'obtiennent en écrivant que θ (pour $t = t_2$) = Θ et $\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_{t=t_2} = 0$.

» Si $\Phi(t) = -\Phi\left(t + \frac{T}{2}\right)$ et si θ ne présente par période T qu'un maximum et un minimum, il est clair que $M_0 = -M e^{\frac{\alpha T}{2}} = M$ et $N_0 = -N_2 e^{\frac{\beta T}{2}} = N$, et l'on a un système de cinq équations pour déterminer t_1 , t_2 , M , N et Θ .

» Les coefficients u_n et v_n de (2) sont donnés par les formules suivantes :

$$(6) \quad u_n = \frac{4}{T} \int_{t_1}^{t_1 + \frac{T}{2}} \theta \sin n\omega t dt = \frac{2}{\pi n} \Theta (\cos n\omega t_1 - \cos n\omega t_2) \\ + \frac{4}{T} \int_{t_1}^{t_1 + \frac{T}{2}} [\Sigma \Gamma_n I_n \cos(n\omega t + \psi_n) - \varepsilon + M e^{\alpha t} + N e^{\beta t}] \sin n\omega t dt,$$

$$(7) \quad v_n = \frac{4}{T} \int_{t_1}^{t_1 + \frac{T}{2}} \theta \cos n\omega t dt = -\frac{2}{\pi n} \Theta (\sin n\omega t_1 - \sin n\omega t_2) \\ + \frac{4}{T} \int_{t_1}^{t_1 + \frac{T}{2}} [\Sigma \Gamma_n I_n \cos(n\omega t + \psi_n) - \varepsilon + M e^{\alpha t} + N e^{\beta t}] \cos n\omega t dt.$$

» Il existe une infinité de fonctions $\Phi(t)$ périodiques qui donnent la même intégrale, à condition qu'elles restent à l'intérieur de

rectangles d'incertitude dont la hauteur est 2ε , la largeur $(t_2 - t_1)$ et l'axe parallèle aux abscisses, d'ordonnée Θ ⁽¹⁾.

» Étant donnée une courbe relevée avec un système oscillant à amortissement discontinu, il ne sera pas possible, en général, d'en déduire complètement la loi du couple déviant, contrairement à ce que l'on peut toujours faire avec un système amorti seulement en

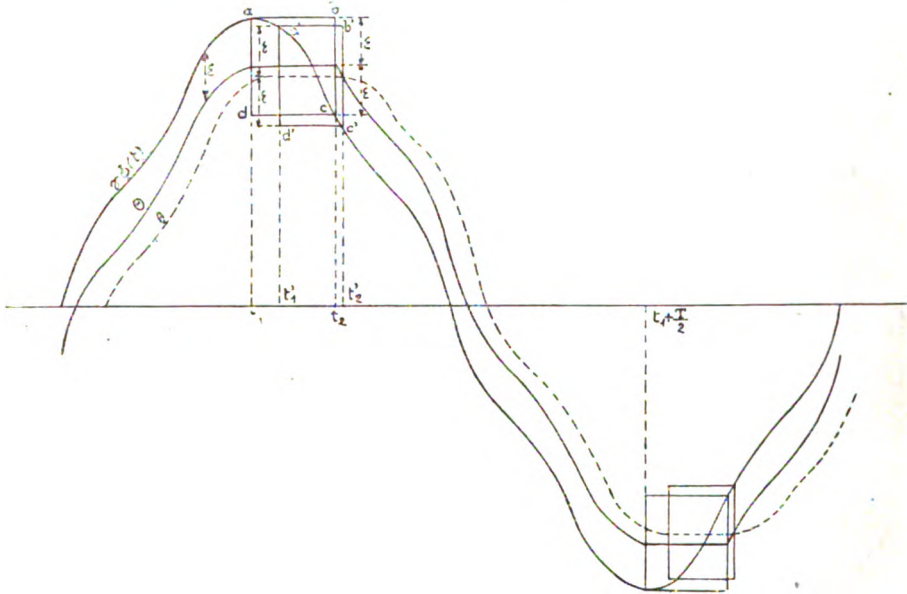


Fig. 5.

raison directe de la vitesse, par l'emploi des différences première et seconde ⁽²⁾. Les parties de la courbe correspondant à un signe déterminé de la vitesse seront relevées de $\pm \varepsilon$ suivant que $\frac{d\theta}{dt}$ est positif ou négatif; on complètera, à l'estime, les tronçons contenus dans les rectangles d'incertitude entre deux points dont on peut rétablir les positions relatives et les tangentes (*fig. 5*).

(1) Si A et K sont nuls, la surface des rectangles d'incertitude est $\left(\frac{\varepsilon}{\gamma}\right)$ étant petit et la fonction $\Phi(t)$ admettant une dérivée dans l'intervalle d'incertitude $t_2 - t_1$

$$S = 4 \frac{\varepsilon^2}{\gamma} \left| \frac{1}{\Phi'_t[t_1 + \eta(t_2 - t_1)]} \right| \quad (0 < \eta < 1).$$

(2) Cf. A. BLONDEL, *Remarques sur la méthode oscillographique* (*Lumière électrique*, janvier 1894).

» 3. Si D est nul, $\theta_n = \Gamma_n I_n$ et $\text{tang}(\varphi_n - \psi_n) = \frac{An\omega}{C - Kn^2\omega^2}$; les conditions auxquelles doivent satisfaire K , A et C pour que la loi du mouvement de l'équipage mobile se rapproche le plus possible de la fonction du temps définissant l'action synchronisante, sont que la période propre τ soit très petite devant la période fondamentale T du couple déviant et l'amortissement voisin de la valeur critique $A = 2\sqrt{KC}$ (1).

» Appliquons à un tel appareil, doué d'amortissement discontinu, les équations précédentes; l'intégrale générale $M_0 e^{\alpha t} + N_0 e^{\beta t}$ prend, dans ce cas, la forme connue

$$(P + Qt)e^{-2\pi\frac{t}{T}} \quad (P, Q \text{ const.});$$

elle est rapidement convergente, car $2\pi\frac{t}{T} = 2\pi\frac{T}{\tau}\frac{t}{T}$ et le rapport $\frac{T}{\tau}$ est, pratiquement, au moins égal à 50. Si θ ne présente, par période, qu'un maximum et un minimum, le rapport $\frac{\varepsilon}{\gamma}$ étant supposé petit, l'intégrale générale amorcée à l'instant t_0 deviendra négligeable au bout de l'intervalle de temps (t_0, t_1) voisin de $\frac{T}{2}$. Il en résulte que θ atteindra son maximum au temps t , défini par l'équation (3) simplifiée

$$(3') \quad 0 = -\omega \Sigma n \Gamma_n I_n \sin(n\omega t_1 + \psi_n),$$

et θ conserve cette valeur maximum

$$(4') \quad \Theta = \Sigma \Gamma_n I_n \cos(n\omega t_1 + \psi_n) - \varepsilon$$

jusqu'à l'époque t_2 , déterminée par l'équation (5) précédente.

» D'une manière générale, les conditions de synchronisation étant remplies, on s'astreindra à accroître la sensibilité statique γ et à rendre l'angle limite ε le plus petit possible. Cela était réalisé dans l'ancien oscillographe à barreau de fer doux, par l'emploi de pivots très fins montés sur rubis et plongés dans l'huile.

» 4. Supposons maintenant que l'on ait relevé, avec un tel système, une courbe dans laquelle il n'y a pas de paliers, mais seulement

(1) Cf. CORNU, *Journal de Physique*, et A. BLONDEL, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXVI, 1893, p. 502.

des discontinuités de $K \frac{d^2 \theta}{dt^2}$ (1). On pourra alors se contenter, par approximation, de développer $Df\left(\frac{d\theta}{dt}\right)$ suivant une série représentant des rectangles.

» Pour simplifier, reprenons le cas d'un maximum et d'un minimum distants de $\frac{T}{2}$. En convenant de prendre, pour origine des temps, l'époque du minimum de θ , il vient

$$(8) \quad Df\left(\frac{d\theta}{dt}\right) = \frac{4}{\pi} D \left[\sin \Omega t + \frac{1}{3} \sin 3\Omega t + \dots + \frac{1}{2p+1} \sin (2p+1)\Omega t + \dots \right],$$

comme dans le cas des oscillations libres; mais ici, la période est imposée par le couple déviant et l'on a $\Omega = \omega$. Par suite, θ étant de la forme

$$\theta = \sum_1^{\infty} \theta_n \cos(n\omega t + \psi_n)$$

sera déterminé par l'équation de substitution :

$$(9) \quad \begin{aligned} & \Sigma (Kn^2\omega^2 - C) \theta_n \cos(n\omega t + \psi_n) \\ & - \Sigma An\omega \theta_n \sin(n\omega t + \psi_n) \\ & + \frac{4}{\pi} D \Sigma \frac{1}{2p+1} \sin(2p+1)\omega t = G \Sigma I_m \cos(m\omega t + \varphi_m). \end{aligned}$$

» Le terme d'ordre n , par exemple, est défini par les deux équations :

$$(10) \quad (Kn^2\omega^2 - C) \theta_n \cos \psi_n - An\omega \theta_n \sin \psi_n = GI_n \cos \varphi_n,$$

$$(11) \quad (Kn^2\omega^2 - C) \theta_n \sin \psi_n + An\omega \theta_n \cos \psi_n + \frac{4}{\pi} \frac{D}{n} = GI_n \sin \varphi_n.$$

(1) Si $\theta = \varepsilon + \Sigma I_m \cos(m\omega t_1 + \varphi_m)$, il n'y a plus de paliers : $t_1 = t_2$ et $\frac{d^2 \theta}{dt^2}$ varie brusquement de

$$(a) \quad \Delta \left(\frac{d^2 \theta}{dt^2} \right) = 2 \frac{D}{K}.$$

C'est le cas qui se présente lorsque, l'amortissement étant faible, $\frac{C}{K}$ est de l'ordre de grandeur de ω^2 . Les équations (3) et (a), auxquelles on adjoint l'égalité

$$\frac{\theta_{dt}}{dt} > 0 = \frac{\theta_{dt}}{dt} < 0 \quad (\text{pour } t = t_1)$$

ou

$$-2\varepsilon + (M_0 - M_2)e^{2t} + (N_0 - N_2)e^{\beta t} = 0,$$

déterminent explicitement t_1 , M et N comme nous l'expliquerons, avec plus de détails, dans un autre Mémoire. La méthode plus simple, exposée ici, suffit pour la pratique.

» Si, en particulier, le couple déviant se réduit au terme fondamental, le couple discontinu créera, dans la loi du mouvement des harmoniques supérieurs, proportionnels au coefficient D ,

$$(12) \quad \theta_n = -\frac{4}{\pi} \frac{D}{n} \frac{1}{\sqrt{(Kn^2\omega^2 - C)^2 + (An\omega)^2}} = \frac{4}{\pi} \frac{\varepsilon}{\gamma} \frac{\Gamma_n}{n},$$

$$(13) \quad \tan \psi_n = \frac{Kn^2\omega^2 - C}{An\omega}.$$

» Les formules (10) et (11) sont applicables, quelle que soit la fonction $\Phi(t)$, pourvu qu'on trouve, dans une période de θ , un maximum et un minimum uniques, distants de $\frac{T}{2}$; sinon, le développement de $Df\left(\frac{d\theta}{dt}\right)$ sera plus complexe.

» *Résonance.* — Imaginons qu'on accorde, par variation du couple directeur, le système oscillant à la résonance mécanique de l'harmonique d'ordre $n = N$.

» Si les autres harmoniques deviennent négligeables ⁽¹⁾ grâce à une faible valeur du coefficient A d'amortissement proportionnel à la vitesse, $Df\left(\frac{d\theta}{dt}\right)$ est encore représenté par la série (8), mais alors $\Omega = N\omega$.

» Les équations (10) et (11), dans lesquelles on fait

$$KN^2\omega^2 - C = 0, \quad \varphi_N = \frac{\pi}{2}, \quad \psi_N = 0,$$

se réduisent à

$$(14) \quad \theta_N = \frac{1}{AN\omega} \left(GI_N - \frac{4}{\pi} D \right).$$

» Introduisons l'angle limite d'incertitude ε et la sensibilité sta-

(1) L'accord du système oscillant, par variation du couple directeur, est, en même temps que l'unique procédé pratique de réglage, la façon la plus heureuse pour réduire au minimum les harmoniques $(N-2)$ et $(N+2)$ voisins de celui en résonance comme l'a montré l'un de nous, pour le cas de la résonance électrique. (Cf. A. BLONDEL, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. CLVIII, 1914, p. 1640.)

D'autre part, on peut toujours réduire l'harmonique fondamental à une valeur aussi petite que l'on veut, par l'emploi de montages appropriés. (Cf. F. CARBENAY, *Bulletin des Ingénieurs de l'École supérieure d'Électricité*, mars 1914.)

tique absolue γ , constantes dont la détermination expérimentale est assez facile; on a finalement

$$\theta_N = \frac{G}{AN\omega} \left(I_N - \frac{4}{\pi} \frac{\varepsilon}{\gamma} \right).$$

» Ainsi, l'amplitude à la résonance de l'harmonique de rang N est égale au produit du coefficient bien connu $\frac{G}{AN\omega}$, par l'amplitude maximum de l'intensité de cet harmonique, diminuée, à un facteur près, du rapport de l'angle limite d'incertitude à la sensibilité statique absolue. On voit donc que, toutes les fois que le facteur d'amplification $\frac{G}{AN\omega}$ sera assez grand pour rendre négligeables les autres harmoniques, les méthodes d'analyse par résonance seront légitimes, malgré les frottements.

III. — SYSTÈMES ÉLECTRIQUES ANALOGUES.

» Tout ce qu'on vient de dire pour les systèmes mécaniques trouve son application immédiate aux systèmes oscillants électriques par l'emploi des règles bien connues de transformation qui permettent de passer par analogie des problèmes mécaniques aux problèmes électriques : la déviation est remplacée par une charge électrique, l'inertie par une self-induction, le couple directeur par l'inverse d'une capacité, l'amortissement ordinaire A par une résistance et la résistance discontinue D sera alors une force contre-électromotrice E s'inversant avec le mouvement oscillatoire (par exemple, celle qui se produit dans un voltamètre mis en série dans le circuit oscillant).

» L'équation mécanique est alors remplacée par une équation électrique

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{c} q \pm E = f(t).$$

» Les phénomènes oscillants électriques dans un tel circuit, abandonné à lui-même après charge préalable ou alimenté par une différence de potentiel alternative de forme quelconque, suivent exactement les mêmes lois que celles exposées ci-dessus et peuvent être enregistrés par un oscillographe approprié. De même, les oscillations forcées produites dans ce circuit par un alternateur en série.

» Enfin, les méthodes qui permettront de déterminer les coefficients caractéristiques R et E seront de simples décalques électriques de celles exposées ci-dessus.

IV. — CONCLUSIONS.

» En résumé, l'introduction d'un amortissement discontinu dans les phénomènes oscillatoires ne modifie pas sensiblement les phénomènes caractéristiques des oscillations libres, mais fait tendre la loi exponentielle de variation des élongations maxima vers une loi purement linéaire.

» Au contraire, le phénomène des oscillations forcées peut être grandement modifié par l'introduction de paliers plus ou moins étendus dans la courbe des oscillations. Lorsque ces paliers sont évités, par exemple, par le réglage à la résonance, l'amplitude obtenue peut servir à la mesure du terme harmonique correspondant.

» Enfin, nous avons montré comment on peut, dans le cas de l'amortissement complexe, isoler expérimentalement les effets de l'amortissement discontinu et de l'amortissement proportionnel à la vitesse. »

M. le PRÉSIDENT. — « Je remercie MM. Blondel et Carbenay de l'intéressante étude que vient de nous exposer M. Guilbert. Le cas étudié de l'amortissement constant avec changement de signe est très fréquent dans les appareils et présentait certaines difficultés de calculs que MM. Blondel et Carbenay ont victorieusement surmontées en complétant les résultats obtenus par d'ingénieuses expériences.

» L'élégante exposition qu'en a faite M. Guilbert nous a grandement facilité l'intelligence de cette question et je le remercie tout particulièrement en votre nom. »

La séance est levée à 18 h 50 m.

RÉSUMÉ DES COMMUNICATIONS ÉTRANGÈRES.

Représentation des pertes totales dans le fer par la formule $W = cB^n$,

par N. W. Mc LACHLAN (*Inst. Elect. Eng.*, mars 1915).

L'auteur a essayé des échantillons de fers de Stalloy, de Lohys, et des plaques de fer d'induit ordinaire. Il estime que pour un maximum de densité de flux (B) compris entre 4000 et 10 000, et pour des fréquences comprises entre 25 et 60, les pertes totales dans les plaques Stalloy (épaisseur 0,5 mm) et dans les plaques de fer ordinaire (épaisseur 1 mm) peuvent être exprimées par la formule $W = cB^n$, sans que l'erreur dépasse 1,5 pour 100; la valeur de n varie de 1,68 à 1,77 pour le fer Stalloy et de 1,75 à 1,83 pour le fer ordinaire. Pour le fer Lohys (plaque de 0,37 mm), B étant compris entre 5000 et 10000, et l'ordre des fréquences étant le même que précédemment, l'erreur peut atteindre 2,5 pour 100; le coefficient propre à cet échantillon varie de 1,73 à 1,82. Le facteur c varie directement avec la fréquence. L'exposant n se rattache à la fréquence par la relation $n = c_1/n_1$; les valeurs de c_1 et n_1 sont respectivement, pour le fer Stalloy : 1,38 et 0,061; pour le fer Lohys : 1,43 et 0,059; pour le fer ordinaire : 1,5 et 0,055.

Petits moteurs d'une fraction de cheval, par B. LETTER

(*Amer. Inst. Elect. Eng.*, mars 1915).

On décrit ici les principaux types de moteurs employés pour les très faibles puissances. Ce sont : 1° les moteurs série propres à fonctionner indifféremment sur courant continu ou sur courant alternatif. En raison de leur caractéristique de vitesse à courbe descendante, ces types ne conviennent qu'à un nombre limité d'applications; 2° les moteurs monophasés, démarrant comme des moteurs à répulsion, et dans lesquels le collecteur est mis en court circuit par un interrupteur centrifuge, ce qui fait fonctionner ces machines comme des moteurs d'induction, aux vitesses normales; 3° les moteurs à phases interrompues, avec rotors en cage d'écureuil, avec ou sans manettes à action centrifuge pour faciliter le démarrage, la phase de démarrage étant ouverte par un interrupteur centrifuge lorsque la vitesse approche de la normale. Ce sont les petits moteurs de cette catégorie qui sont les plus fréquemment employés sur les circuits alternatifs. Il importe que le type de moteur choisi dans un but déterminé possède une caractéristique y appropriée, sinon ces machines minuscules risqueraient de rebuter ceux qui en usent. Le régime des moteurs affectés aux usages domestiques doit être tel qu'il se produise peu d'échauffement, le contact d'une température trop élevée pouvant, en pareils cas, prêter à suspicion.

Troubles dans les balais de charbon, par E. H. MARTINDALE

(*Amer. Inst. Elect. Eng.*, mars 1915).

Ce Mémoire traite fort brièvement des troubles qui affectent le fonctionnement des balais de charbon dans les moteurs et les génératrices. Il sera d'un grand secours au

praticien pour reconnaître divers dérangements des machines, et pour assurer la meilleure utilisation de leurs balais. Le Mémoire se divise en cinq parties : 1° champ ; 2° induit ; 3° collecteur et bague collectrice ; 4° causes électriques externes ; 5° causes mécaniques externes.

Élévateurs actionnés par moteurs à cage d'écureuil ou à rotor bobiné,

par J. C. LINCOLN (*Amer. Inst. Elect. Eng.*, mars 1915).

L'auteur examine les mérites de ces deux types de machine appliqués aux élévateurs commandés par des démarreurs automatiques. Afin de limiter la perturbation en ligne, nombre de compagnies de distribution préconisent l'emploi de moteurs à rotor bobiné ; cette préférence est judicieusement discutée. L'élévateur est d'ordinaire actionné par un engrenage à vis sans fin, et vu l'expulsion de l'huile lors des faibles vitesses ou des arrêts, le frottement au démarrage est considérable. Au démarrage, le rendement, pour bien des machines de provenances diverses, est de 15 à 20 pour 100 ; pour telle machine, à vis sans fin en acier et à roue en fonte, ayant deux ans et demi de service, le rendement au démarrage est de 16 pour 100, et le rendement en marche de 32,5 pour 100 ; cette machine a une capacité normale de 3000 lbs (1360 kg). Au moyen du diagramme en cercle, une comparaison est faite entre les propriétés du moteur à rotor bobiné et de certain moteur à cage d'écureuil à grande résistance d'induit, calculé de manière à donner son effort maximum au démarrage. L'auteur arrive aux conclusions suivantes : 1° si l'on emploie un type de commande à relais série avec un rotor bobiné, l'effort maximum doit s'exercer dès le premier degré, afin d'obtenir un démarrage sûr ; 2° pour le même effort maximum, le moteur à cage d'écureuil absorbe d'autant moins d'intensité que le facteur de puissance est plus élevé ; 3° en régime de travail normal, le moteur à cage d'écureuil absorbe moins d'intensité, à facteur de puissance élevé, que la machine à rotor bobiné ; 4° pour obtenir du type à rotor bobiné les résultats les meilleurs, il faut employer un amortisseur à air, coupant les résistances à des intervalles de temps réguliers. Pratiquement, ce système de commande n'est guère en faveur ; 5° supérieur comme simplicité et commodité, le type à cage d'écureuil apporterait à l'élévateur électrique un surcroît de succès.

Relations mathématiques entre le flux et les ondes du courant d'aimantation pour les fortes densités de flux, par A. L. TACKLEY (*Inst. Elect. Eng.*, avril 1915).

Les résultats obtenus par M. J. S. Nicholson (ici résumés) sont discutés dans le présent Mémoire. Il est démontré notamment que pour le fer « Stalloy » soumis aux densités de flux élevées, la relation $H = \left(\frac{B}{10900} \right)^{1.1}$ est approximativement exacte, et que, aux faibles densités, la courbe dépend de la boucle d'hystérésis. Sur cette base, sont tracées, d'une part la courbe du courant d'aimantation nécessaire pour produire une onde de flux sinusoïdale, d'autre part la courbe de flux résultant d'une onde de courant sinusoïdale. Cette étude analytique concorde avec ce qui a été obtenu expérimentalement par M. Nicholson.

Application de l'électricité au traitement industriel du minerai, par C. D. GILPIN
(*Amer. Inst. Elect. Eng.*, mars 1915).

Le Mémoire comporte une description d'ensemble des méthodes les plus typiques de traitement du minerai, depuis la mine jusqu'au haut fourneau, ainsi que la description des diverses machines employées dans les phases successives de l'opération. Les principes généraux concernant l'application des moteurs électriques à ces diverses machines sont ensuite discutés, de même que la catégorie de moteurs la mieux appropriée au travail; enfin l'installation motrice elle-même est examinée. Les points essentiels à considérer sont : 1^o la détermination de la voie la plus courte pour l'acheminement du minerai; 2^o la détermination des caractéristiques des charges à acheminer; 3^o le choix de l'équipement électrique propre à transporter ces charges avec le minimum d'énergie et le maximum de sécurité; enfin 4^o l'installation d'une sous-station pour traiter la charge d'une manière satisfaisante et économique, en considérant à la fois les sommes d'énergie requises et le total de kilowatts-heure consommés.

Réglage inhérent aux générateurs alternatifs synchrones, par A. STILL
(*Inst. Elect. Eng.*, avril 1915).

Il est traité ici de la nature de la « réaction d'induit » et de la « réactance d'induit » dans les alternateurs à pôles saillants. L'emploi des diagrammes-vecteurs, pour déterminer à l'avance le réglage d'une machine, est comparé avec les méthodes qui impliquent le tracé de courbes de répartition de flux en régime de charge.

IL Y A TRENTE ANS.

Décembre 1885. — Sur les effets de la machine rhéostatique de M. Gaston Planté, par M. Paul Samuel. — Les communications téléphoniques à grande distance, par M. Maiche. — De l'électro-mégascopie, par M. le D^r Boisseau du Rocher.

TABLE ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES

CONTENUES DANS LE TOME V (3^e SÉRIE).

Bibliographie.

	Pages.
Annuaire du Bureau des Longitudes pour l'année 1915.....	64
Conférences de Radiumbiologie faites à l'Université de Gand en 1913, sous les auspices de MM. Jacques Danne et J. de Nobele.....	31
Cours d'Électricité industrielle : Le courant continu; l'éclairage électrique, par M. F. Magonnette.....	32
Cours de Mécanique physique, par M. H. Bouasse.....	100
Cours de Physique, par M. E. Rothé.....	31
Dictionnaire juridique de l'Industrie électrique, par M. E. Carpentier.....	32
Guide juridique et administratif des Entrepreneurs de distribution d'énergie électrique, par M. Ch. Sirey.....	196
Tables annuelles de Constantes et données numériques de Chimie, de Physique, de Technologie, publiées par la Comité international de Chimie appliquée.....	64
Téléphonie (La) et autres moyens d'intercommunication dans l'industrie, les mines et les chemins de fer, par M. P. Maurer.....	196
Traité de Physique, par M. O.-D. Chwolson.....	240

Communications diverses.

Allocution de M. E. Brylinski, Président.....	5
Assemblée générale du 1 ^{er} avril 1915.....	101
Bibliographie.....	31, 64, 100, 196, 240
Distinctions honorifiques.....	66, 354
Don à l'École supérieure d'Électricité.....	16
Errata.....	316, 352
Il y a trente ans.....	26, 64, 100, 164, 196, 240, 287, 316, 352, 396
Membres décédés.....	8, 33, 65, 102, 166, 198, 317
Membres titulaires (Admission de).....	16, 166, 197, 242, 317
Note sur la carrière de Pollard (Jules-Amboise), 1852-1915.....	319
Ouvrages offerts (Liste des).....	26, 164, 288
Proposition relative au maintien provisoire en fonctions des membres du Bureau et du Comité d'administration.....	67
Rapport annuel sur le Laboratoire et l'École, par M. P. Jauret.....	113
Rapport de la Commission des Comptes (M. G. Dehenne).....	102
Rapport du Comité d'administration (M. le Secrétaire général intérimaire).....	109
Renouvellement des annonces.....	288

	Pages.
Résultat du Vote sur les propositions soumises à l'Assemblée générale.....	162
Résumé des Communications étrangères..... 27, 62, 98, 193, 238, 283, 316, 352,	394
Réunion ordinaire mensuelle du 6 janvier 1915.....	5
Réunion ordinaire mensuelle du 4 février 1915.....	33
Réunion ordinaire mensuelle du 4 mars 1915.....	65
Réunion ordinaire mensuelle du 1 ^{er} avril 1915.....	101
Réunion ordinaire mensuelle du 6 mai 1915.....	165
Réunion ordinaire mensuelle du 3 juin 1915.....	197
Réunion ordinaire mensuelle du 1 ^{er} juillet 1915.....	241
Réunion ordinaire mensuelle du 4 novembre 1915.....	317
Réunion ordinaire mensuelle du 2 décembre 1915.....	353
Situation financière et Bilan de la Société..... 122,	124

Communications techniques.

Appareil semi-automatique de visée et de tir sur buts mobiles, par M. Brocq.....	17
Bobine d'électro-aimant (Sur une forme avantageuse de), par M. A. Perot.....	199
Compteurs d'électricité actuels (Les), par M. Ilievici.....	245
Contribution à l'étude des piles électriques, par M. H. Bellini.....	35
Courants dans les arbres de dynamos (Sur les), par M. P. Girault..... 45,	137
Éléments de circuits à courant continu ou à flux continu en parallèle. Application à un mode de production de courant continu dans les arbres de dynamo. Machines à pôles conséquents. Extension aux moteurs d'induction, par M. P. Girault.....	323
Installations électromécaniques des mines de fer d'Ingoulet (Les), par M. H. Besson.....	290
Lignes et appareils téléphoniques (Sur les), par M. L. Cahen.....	209
— Observation de M. P. Janet.....	236
Mesures du rendement par les méthodes directes (Sur les), par M. C.-F. Guilbert... 167	379
Oscillations à amortissement complexe, par MM. A. Blondel et F. Carbenay.....	355
Perméabilité du fer aux fréquences élevées, par M. Jouaust.....	69
Préparation du bore pur; ses propriétés; ses applications, d'après les travaux de E. Weintraub, par M. H. Chaumat.....	243
Remarque sur un cas particulier de décharge oscillante, par M. P. Janet.....	243

Résumé des communications étrangères.

Application de l'électricité au traitement industriel du minerai, par M. C.-D. Gilpin.....	396
Avantages d'un pont neutre à la terre dans les systèmes de distribution, par MM. J.-P. Jollyman, P.-M. Downing et F.-G. Baum.....	194
Calcul de matériel roulant pour tramways électriques, par M. H.-E. O'Brien.....	193
Connexions Δ et Y dans le transport et la distribution d'énergie pour chemins de fer, par M. C.-M. Davis.....	287
Construction d'une station de télégraphie sans fil, par M. C.-G. Roach.....	284
Convertisseurs de fréquence statiques, par M. A.-M. Taylor.....	283

	Pages
Déformation des ondes d'un courant alternatif par suite d'une variation cyclique de résistance, par MM. F. Bedell et E.-C. Mayer.....	352
Distribution de l'énergie électrique (Rapport sur la).....	27
Données relatives aux systèmes de distribution à haute tension, par un Comité d'ingénieurs.....	286
Éclateur sphérique pour la mesure des hautes tensions (L'), par M. F.-W. Peek.....	238
Effet de l'électrolyse sur la force compressive du ciment et du béton, par MM. C.-E. Magnusson et B. Izhuoroff.....	286
Effet des connexions Δ et Y sur les formes d'ondes des transformateurs, par M. L.-F. Curtiss.....	284
Élévateurs actionnés par moteurs à cage d'écureuil ou à rotor bobiné, par M. J.-C. Lincoln.....	395
Énergie électrique (L'), par MM. D.-B. Rushmore et Eric A. Lof.....	30
État actuel des parafoudres à aluminium, par M. E.-E.-F. Creighton.....	30
Étude de quelques systèmes triphasés, par M. Ch. Fortescue.....	98, 194
Expériences faites par la « Pacific Gas and Electric Co » de Californie sur la mise à la terre du neutre, par MM. J.-P. Jollyman. P.-M. Downing et F.-G. Baum.....	98
Expériences sur les transformateurs de ligne, par M. D.-W. Roper.....	98
Forces électromotrices alternatives en parallèle, par M. A.-E. Clayton.....	283
Influence des connexions des transformateurs sur leur fonctionnement, par M. Louis Blume.....	99
Isolateurs de 55 000 volts, par M. T. Crawford.....	283
Lampes électriques portatives pour mines, par M. H.-O. Swoboda.....	194
Maladies de transformateurs, par M. J.-L. Thompson.....	285
Méthodes suggérées pour l'amélioration du service téléphonique, par M. W. Aitken..	284
Moteur à courant continu pour ponts transbordeurs de charbon ou de minerai, par M. R.-H. Mac Lain.....	195
Moteurs d'une fraction de cheval (Petits), par M. B. Letter.....	394
Quelques observations relatives à la traction électrique sur les chemins de fer, par M. l'Ingénieur E. Grismayer.....	195
Réglage inhérent aux générateurs alternatifs synchrones, par M. A. Still.....	396
Relations mathématiques entre le flux et les ondes de courant d'aimantation pour les fortes densités du flux, par M. A. Tackley.....	395
Représentation des pertes totales dans le fer par la formule $W = cB^n$, par M. N.-L. W. Mc Lachlan.....	394
Rotations ionomagnétiques (Les), par M. A. Righi.....	62
Signaux accoustiques sous-marins, par M. R.-F. Blake.....	284
Spécification relative à l'essai des isolateurs.....	316
Tensions de décharge entre éclateurs sphériques aux fréquences élevées, par MM. J.-C. Clark et H.-J. Ryan.....	238
Tensions inhérentes aux connexions en Y et en Δ , par MM. R.-W. Sorensen et W.-L. Newton.....	238
Troubles dans les balais de charbon, par M. E.-H. Martindale.....	394
Voitures à accumulateurs (Discussion).....	239

TABLE ALPHABÉTIQUE DES AUTEURS

CITÉS DANS LE TOME V (3^e SÉRIE).

	Pages
AITKEN (W.). — Méthodes suggérées pour l'amélioration du service téléphonique (Résumé).....	284
BAUM (F.-G.), JOLLYMAN (J.-P.), DOWNING (P.-M.). — Avantages d'un point neutre à la terre dans les systèmes de distribution (Résumé).....	194
BAUM (F.-G.), JOLLYMAN (J.-P.) et DOWNING (P.-M.). — Expériences faites par la « Pacific Gas and Electric » de Californie sur la mise à la terre du neutre (Résumé).....	286
BEDELL (P.) et MAYER (E.-C.). — Déformations des ondes d'un courant alternatif par suite d'une variation cyclique de résistance (Résumé).....	352
BELLINI (H.). — Contribution à l'étude des piles électriques.....	35
BESSON (H.). — Installations électromécaniques des mines de fer d'Ingoulet (Les) ..	290
BLAKE (R.-F.). — Signaux acoustiques sous-marins (Résumé).....	284
BLONDEL (A.) et CARBENAY (F.). — Oscillations à amortissement complexe.....	379
BLUME (Louis). — Influence des connexions des transformateurs sur leur fonctionnement (Résumé).	99
BOUASSE (H.). — Cours de Mécanique physique (<i>Bibl.</i>).....	100
BROCCQ. — Appareil semi-automatique de visée et de tir sur buts mobiles.....	17
BRYLINSKI (E.), Président. — Allocution.....	5
CAHEN (L.). — Lignes et appareils téléphoniques (Sur les).....	209
CARBENAY (F.) et BLONDEL (A.). — Oscillations à amortissement complexe.....	379
CARPENTIER (E.). — Dictionnaire juridique de l'Industrie électrique (<i>Bibl.</i>).....	32
CHAUMAT (H.). — Préparation du bore pur; ses propriétés; ses applications.....	69
CHWOLSON (O.-D.). — Traité de Physique (<i>Bibl.</i>).....	240
CLARK (J.-C.) et RYAN (H.-J.). — Tensions de décharge entre éclateurs sphériques aux fréquences élevées (Résumé).....	238
CLAYTON (A.-E.). — Forces électromotrices alternatives en parallèle (Résumé).....	283
CRAWFORD (T.). — Isolateurs de 55 000 volts (Résumé).....	283
CREIGHTON (E.-E.-F.). — État actuel des parafoudres à aluminium (Résumé).....	30
CURTISS (L.-F.). — Effet des connexions Δ et Y sur les formes d'onde des transformateurs (Résumé).....	284
DANNE (Jacques) et NOBELE (J. DE). — Conférences de Radiumbiologie faites à l'Université de Gand en 1913 (sous les auspices de) (<i>Bibl.</i>).....	31
DAVIS (C.-M.). — Connexions Δ et Y dans le transport et la distribution d'énergie pour chemins de fer (Résumé).....	287
DEHENNE (G.). — Rapport de la Commission des Comptes.....	102

	Pages.
DOWNING (P.-M.), BAUM (F.-G.) et JOLLYMAN (J.-P.). — Expériences faites par la « Pacific Gas and Electric Co » de Californie sur la mise à la terre du neutre (Résumé).....	98
DOWNING (P.-M.), BAUM (F.-G.) et JOLLYMAN (J.-P.). — Avantages d'un point neutre à la terre dans les systèmes de distribution (Résumé).....	194
FORTESCUE (Ch.). — Étude de quelques systèmes triphasés (Résumé).....	98, 194
GILPIN (G.-D.). — Application de l'électricité au traitement industriel du minerai (Résumé)	396
GIRAULT (P.). — Courants dans les arbres de dynamos (Sur les)	45, 137
— Éléments de circuits à courant continu ou à flux continu en parallèle. Application à un mode de production de courant continu dans les arbres de dynamo. Machines à pôles conséquents. Extension aux moteurs d'induction.....	323
GRISMAYER (L'Ing. E.). — Quelques observations relatives à la traction électrique sur les chemins de fer (Résumé).....	195
GUILBERT (C.-F.). — Mesures du rendement par les méthodes directes (Sur les).....	167
ILIOVICI. — Compteurs d'électricité actuels (Les).....	245
IZHUROFF (B.) et MAGNUSSON (C.-E.). — Effet de l'électrolyse sur la force compressive du ciment et du béton (Résumé).....	286
JANET (P.). — Rapport annuel sur le Laboratoire et l'École.....	113
— Observation sur la Communication de M. L. Cahen.....	236
— Remarque sur un cas particulier de décharge oscillante.....	243
JOLLYMAN (J.-P.), DOWNING (P.-M.) et BAUM (F.-G.). — Avantages d'un point neutre à la terre dans les systèmes de distribution (Résumé).....	194
— Expériences faites par la « Pacific Gas and Electric Co » de Californie sur la mise à la terre du neutre (Résumé).....	98
JOUAUST (R.). — Perméabilité du fer aux fréquences élevées (La).....	355
LACHLAN (N.-W. Mc). — Représentation des pertes totales dans le fer par la formule $W = c B^n$ (Résumé).....	394
LETTER (B.). — Petits moteurs d'une fraction de cheval (Résumé).....	394
LINCOLN (J.-C.). — Élévateurs actionnés par moteurs à cage d'écureuil ou à rotor bobiné (Résumé).....	395
LOF (Eric A.) et RUSHMORE (D.-B.). — Énergie électrique (L') (Résumé).....	30
MAC LAIN (R.-H.). — Moteur à courant continu pour ponts transbordeurs de charbon ou de minerai (Résumé).....	195
MAGNUSSON (C.-E.) et IZHUROFF (B.). — Effet de l'électrolyse sur la force compressive du ciment et du béton (Résumé).....	286
MAGONNETTE (F.). — Cours d'Électricité industrielle : Le courant continu; l'éclairage électrique (<i>Bibl.</i>).....	32
MARTINDALE (E.-H.). — Troubles dans les balais de charbon (Résumé).....	394
MAURER (P.). — La téléphonie et autres moyens d'intercommunication dans l'industrie, les mines et les chemins de fer (<i>Bibl.</i>).....	196
MAYER (E.-C.) et BEDELL (F.). — Déformation des ondes d'un courant alternatif par suite d'une variation cyclique de résistance (Résumé).....	352
NEWTON (W.-L.), SORENSSEN (R.-W.). — Tensions inhérentes aux connexions en Y et en Δ (Résumé).....	238
NOBELE (J. DE) et DANNE (Jacques). — Conférences de Radiumbiologie faites à	

	Pa ges.
l'Université de Gand en 1913 (<i>Bibl.</i>).....	31
O'BRIEN (H.-E.). — Calcul de matériel roulant pour tramways électriques (Résumé).....	193
PEEK (F.-W.). — Éclateur sphérique pour la mesure des hautes tensions (L') (Résumé).....	238
PEROT (A.). — Bobine d'électro-aimant (Sur une forme avantageuse de).....	199
RIGHI (A.). — Rotations ionomagnétiques (Les).....	62
ROACH (C.-G.). — Construction d'une station de télégraphie sans fil (Résumé).....	284
ROPER (D.-W.). — Expériences sur les transformateurs de ligne.....	98
ROTHÉ (E.). — Cours de Physique (<i>Bibl.</i>).....	31
RUSHMORE (D.-B.) et LOF (ERIC A.). — Énergie électrique (L').....	30
RYAN (H.-J.) et CLARK (J.-C.). — Tensions de décharge entre éclateurs sphériques aux fréquences élevées (Résumé).....	238
SABOURAIN (J.-A.), Secrétaire général intérimaire. — Rapport du Comité d'ad- ministration.....	109
SIREY (Ch.). — Guide juridique et administratif des Entrepreneurs de distribution d'énergie électrique (<i>Bibl.</i>).....	196
SORENSEN (R.-W.) et NEWTON (W.-L.). — Tensions inhérentes aux connexions en Y et en Δ (Résumé).....	238
STILL (A.). — Réglage inhérent aux générateurs alternatifs synchrones (Résumé).....	396
SWOBODA (H.-O.). — Lampes électriques portatives pour mines (Résumé).....	194
TACKLEY (A.-L.). — Relations mathématiques entre le flux et les ondes de cou- rant d'aimantation pour les fortes densités du flux (Résumé).....	395
TAYLOR (A.-M.). — Convertisseurs de fréquence statiques (Résumé).....	283
THOMPSON (I.-L.). — Maladies de transformateurs (Résumé).....	285



PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS ET C^e,
55533 Quai des Grands-Augustins, 55.



